

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robotiky

Návrh levného manipulátoru pro mobilní robot

The Mechanical Design of a Low-cost Mobile Robot Manipulator

Student:

Bc. Dominik Heczko

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Zdenko Bobovský, PhD.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra robotiky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Dominik Heczko**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2301T013 Robotika  
Téma: **Návrh levného manipulátoru pro mobilní robot**  
**The Mechanical Design of a Low-cost Mobile Robot Manipulator**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Analýza současného stavu
2. Specifikace požadavkového listu
3. Mechanická část
4. Hardwarová část
5. Simulace pohybu robota - využití dostupného simulačního programu
6. Práci též doložte v elektronické podobě ve formátu MS WORD
7. K práci doložte CAD model, výkresovou dokumentaci a simulační model

Seznam doporučené odborné literatury:

Robotika – Servisné roboty, Navrhovanie, Konštrukcia, Riešenia. Košice: Vydavateľstvo Michala Vaška, 2008. ISBN 978-80-7165-713-2.  
Robotika – Metodika nasadzovania servisných robotov. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2013. ISBN 978-80-5553-1523-2.  
Teorie průmyslových robotů. Košice: Viena Košice, 2000. ISBN 80-88922-35-6.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdenko Bobovský, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018

prof. Dr. Ing. Petr Novák  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. 5. 2018

.....

Podpis

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo).
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona).
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce.
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21.5.2018

.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Dominik Heczko

Adresa trvalého pobytu autora práce:



## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Zdenku Bobovskému, PhD. za cenné rady, připomínky, trpělivost a odborné vedení. Rád bych také poděkoval celé své rodině za podporu při studiu.

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HECZKO, D. *Návrh levného manipulátoru pro mobilní robot: diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická Univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra Robotiky, 2018, 58s., Vedoucí práce: Ing. Zdenko Bobovský, PhD.

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem manipulátoru pro mobilní robot, který jen určen pro studentskou soutěž European Rover Challenge. V úvodní části práce je proveden rozbor pravidel této soutěže a průzkum obdobných systémů pro mobilní platformy. Následně byl vytvořen požadavkový list a tři kinematické struktury manipulátoru. Optimální varianta byla podrobněji zpracována, doplněna 3D modelem, kontrolními výpočty a požadovanou výkresovou dokumentací.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

HECZKO, D. *The Mechanical Design of a Low-cost Mobile Robot Manipulator: master thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics, 2018, 58p., Head of thesis: Ing. Zdenko Bobovský, PhD.

This thesis deals with construction design of a mobile robot manipulator, which is designed for student competition European Rover Challenge. In the introductory part of the thesis an analysis of the rules of this event is made and research of similar systems for mobile platforms as well. In the next section a request list was compiled and three variants of kinematic structures were designed. Subsequently, the resulting variant was further elaborated in detail and supplemented with a 3D model, control calculations and the required drawings documentation.

## Obsah

1	Úvod .....	- 9 -
2	Všeobecné informace a požadavky .....	- 9 -
2.1	Rozbor úloh.....	- 10 -
2.1.1	Vědecká úloha – geologie.....	- 10 -
2.1.2	Úloha údržby.....	- 11 -
2.1.3	Pomocná úloha.....	- 13 -
2.2	Analýza současného stavu.....	- 14 -
2.2.1	SRA Service Robot Arm.....	- 14 -
2.2.2	Kinova Mico <sup>2</sup> Arm.....	- 15 -
2.2.3	Manipulator H.....	- 15 -
2.2.4	LWA 4P Gallery .....	- 16 -
3	Požadavkový list.....	- 17 -
4	Varianty řešení.....	- 18 -
4.1	Varianta A .....	- 18 -
4.2	Varianta B .....	- 20 -
4.3	Varianta C .....	- 22 -
4.4	Kriteriální analýza.....	- 24 -
4.4.1	Hodnocená kritéria.....	- 24 -
4.4.2	Stupnice hodnocení.....	- 24 -
4.4.3	Metoda trojúhelníkových párů.....	- 25 -
4.5	Hodnocení variant .....	- 25 -
4.5.1	Varianta A.....	- 26 -
4.5.2	Varianta B.....	- 26 -
4.5.3	Varianta C .....	- 27 -
4.5.4	Vítězná varianta .....	- 27 -
5	Mechanická část – návrh manipulátoru .....	- 28 -
5.1	Manipulátor – celek.....	- 28 -
5.2	Návrh kloubu K5.....	- 29 -
5.3	Návrh kloubu K4.....	- 30 -
5.4	Návrh kloubu K3.....	- 33 -
5.5	Návrh kloubu K2.....	- 36 -
5.6	Návrh kloubu K1 .....	- 38 -
5.7	Základna .....	- 40 -
5.8	Krytování.....	- 41 -
5.8.1	Krytování kloubu 5 .....	- 42 -
5.8.2	Krytování kloubu 4 .....	- 42 -

5.8.3	Krytování kloubu 3 .....	- 43 -
5.8.4	Krytování kloubu 2 .....	- 43 -
5.8.5	Krytování kloubu 1 .....	- 44 -
6	Hardwarová část – výběr komponent .....	- 44 -
6.1	Výběr pohonů .....	- 44 -
6.2	Výběr kontrolérů .....	- 46 -
6.3	Výběr potenciometrů .....	- 47 -
6.4	Blokové schéma zapojení .....	- 48 -
7	Simulace pohybu robotu .....	- 49 -
7.1	Simulační model .....	- 49 -
7.2	Požadované polohy .....	- 50 -
7.3	Inverzní úloha kinematiky .....	- 51 -
8	Závěr .....	- 53 -
9	Použitá literatura .....	- 54 -
10	Seznam obrázků .....	- 55 -
11	Seznam tabulek .....	- 57 -
12	Seznam příloh .....	- 58 -



## 1 Úvod

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem manipulátoru pro mobilní robot. Robot je určen pro soutěž European Rover Challenge (dále jen ERC). ERC je studentská zahraniční soutěž roverů na simulovaném prostředí Marsu.

Robot musí vykonat několik úloh: vědecká úloha – geologie, úloha údržby, pomocná úloha a navigační úloha. V každé úloze je nutno splnit několik úkolů, za které se získává body. Některé úkoly jsou bonusové a není nutné je plnit. Mezi jednotlivými úlohami se může konfigurace robotu libovolně měnit (např. může se vyměnit efektor).

Veškeré úlohy musí robot vykonat bez kontaktu s obsluhou. Při dotyku obsluhy s robotem v probíhající úloze se přijde o veškeré body a úloha se musí vykonat znovu.



Obr. 1 - prostředí ERC [1]

## 2 Všeobecné informace a požadavky

Rovery se pohybují v zakryté hale po směsi antuky s pískem. Teplota haly se pohybuje v rozmezí od  $10^{\circ}$  do  $30^{\circ}$ . Žádná úloha by neměla trvat déle než 25 *min* a nemělo by se ujet více než 100 *m*. Doporučená rychlost robotu je 3 *km/h*.

Robot musí být samostatná mobilní platforma. Není povolena žádná externí kabeláž (napájení, komunikace...).

Rover je řízen dálkově operátorem v reálném čase z řídicí oblasti. Operátor nemá přímý dohled na rover, vidí pouze výstupy ze senzorů (např. obraz z kamery).

Hmotnost roveru nesmí překročit v žádné úloze 50 kg. Počítají se pouze součásti připevněné na robotu. Součásti k údržbě a přípravě nebo jiné elementy, které nejsou použity na roveru (např. druhý typ efektoru) se do limitu nezapočítávají. Vybavení pro řízení roveru je bez hmotnostního limitu. [2]

## **2.1 Rozbor úloh**

Ke konstrukci manipulátorů je nutné znát jednotlivé úkoly robotu, ze kterých se určí požadavky na rameno.

### **2.1.1 Vědecká úloha – geologie**

Cílem této úlohy je nasbírat tři vzorky „mart'anské půdy“. Každý vzorek se odebírá z jiného místa (určeno organizátorem). Vzorky se musí uložit zvlášť do nádobky na robotu a odvést na určené místo, kde se posoudí porotou. [2]

Cíle:

- Přijet na určené místo;
- Nasbírat 3 vzorky půdy;
  - Kámen – minimální hmotnost 100 g;
  - Vzorek povrchové půdy – minimálně 200 g;
  - Vzorek půdy z hloubky minimálně 15 cm – minimálně 25 g;
- Doručit vzorky na startovní linii.

Bonusy:

- Nafotit vzorky;
- Zvážit vzorky na robotu;
- Změřit rozměry kamene;
- Provést měření okolních vzorků;
- Vykopat příkop.

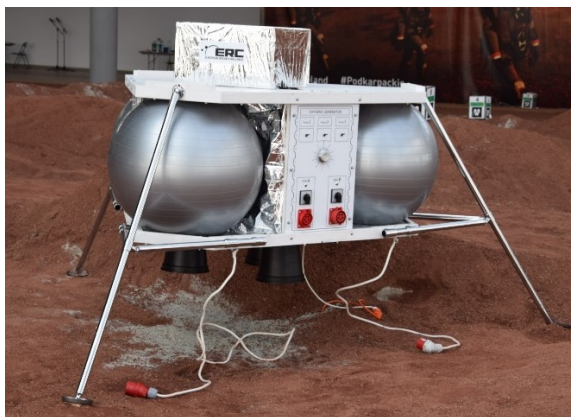
Minimální rozlišení pro pořízení snímku je 800x600 pixelů. Tolerance pro změření vzorku je 5 mm. Příkop musí být minimálně 30 cm dlouhý a 5 cm hluboký. Stěna musí být rovná, aby šlo vidět vrstvy půdy. [2]



Obr. 2 - Vzorek – kámen [1]

### 2.1.2 Úloha údržby

V této úloze se jedná o obsluhu dvou, od sebe vzdálených, panelů, na kterých jsou umístěné spínače. Pomocí roveru je nutné tyto spínače dát do správné pozice.



Obr. 3 - Panel A [1]



Obr. 4 - Panel B [1]

#### Cíle:

- Prezentace koordinace při jemné manipulaci;
- Přijet k prvnímu panelu;
- Dát spínače do správné pozice;
- Změřit napětí na terminálu;
- Přijet ke druhému panelu;
- Otočit spínač do polohy „zapnuto“;
- Nastavit knoflík na požadovanou hodnotu.

#### Bonus:

- Zvednout ze země zástrčku a vložit ji do zásuvky.

Prvky k manipulaci budou umístěny v rozmezí od 0,2 m do 1,5 m nad zemí. Spínače a ostatní ovládací prvky budou průmyslového typu. Spínače budou rotační nebo páčky.

Měření napětí bude mezi 1 VDC a 24 VDC, s tolerancí 0,5 V.

### 2.1.3 Pomocná úloha

Cílem této úlohy je zvednout součást a doručit ji v požadované poloze do cílového místa. Pak je nutné doručit na startovní linii hlášení o ukončení mise. [2]

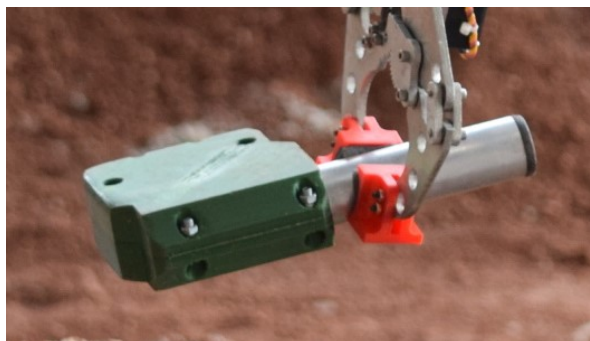
Cíle:

- Přijet k místu položené součásti;
- Zvednout součást a demonstrovat stabilní manipulaci po dobu minimálně 10 s;
- Transportovat součást na požadované místo;
- Uložit součást v požadovaném místě a poloze;
- Vyfotit součást ve finální poloze a místě;
- Doručit foto porotě (e-mailem, USB nebo v tištěné podobě).

Bonus:

- Přinést bonusovou součást z těžko dostupného místa.

Hmotnost součásti bude menší než 300 g, poloha těžiště je neznámá. Rozměry součásti k manipulaci nepřesáhnou: průměr 30 mm, délka 100 mm.



Obr. 5 - Součást k manipulaci [1]

## 2.2 Analýza současného stavu

Pro inspiraci a lepší návrh manipulátoru byla provedena analýza aktuálního stavu manipulátorů pro mobilní platformy.

### 2.2.1 SRA Service Robot Arm

Rameno je určeno pro servisní úlohy, výuku a zábavu. V manipulátoru jsou použity pohony od Maxonu. V druhém a třetím kloubu jsou vloženy převodovky od Harmonic Drive. Motor drivery jsou integrovány v rameni. Všechny moduly jsou spojeny přes sběrnici CAN. [3]

Tab. 1 - Parametry SRA Service manipulátoru

Parametr	Hodnota/popis
Počet DoF	6
Nosnost	750 g
Dosah	850 mm
Hmotnost	6 kg
Napájení	24 V



Obr. 6 - SRA Service [3]



### 2.2.2 Kinova Mico<sup>2</sup> Arm

Rameno disponuje 6 DoF s možností úpravy na 4 DoF. Manipulátor umožňuje neomezenou rotaci v každém kloubu. Pohyb je plynulý a tichý. Rám je vyroben z karbonových vláken. Základna je vyrobená z extrudovaného hliníku a může být připevněna téměř k jakémukoli povrchu. [4]

Tab. 2 - Parametry Kinova Mico<sup>2</sup>

Parametr	Hodnota/popis
Počet DoF	6 (4)
Nosnost	1,5 kg (2,7 kg)
Dosah	700 mm (550 mm)
Hmotnost	4,6 kg (3,8 kg)



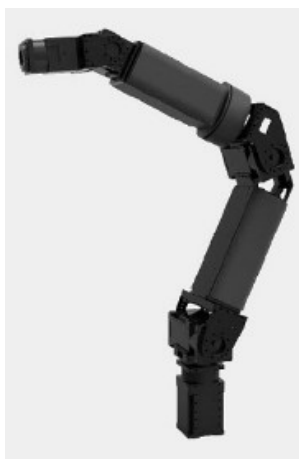
Obr. 7 - Kinova Mico<sup>2</sup> [4]

### 2.2.3 Manipulator H

Rameno určeno pro mobilní zařízení nebo humanoidní roboty. Manipulátor disponuje 6 DoF s přesností opakování  $\pm 0,5 \text{ mm}$ . Systém je zhotoven z modulárních celků, které umožňují jednoduchou údržbu. [5]

Tab. 3 - Parametry Manipulátoru H

Parametr	Hodnota/popis
Počet DoF	6
Nosnost	3 kg
Dosah	633 mm
Hmotnost	5,5 kg



Obr. 8 - Manipulator H [5]

#### 2.2.4 LWA 4P Gallery

Manipulátor je určen hlavně pro humanoidní roboty a servisní roboty. Robot je v konfiguraci 6 DoF s přesností opakování 0,06 *mm*. [6]

Tab. 4 – Parametry LWA 4P Gallery

Parametr	Hodnota/popis
Počet DoF	6
Nosnost	6 kg
Dosah	610 mm
Hmotnost	12,5 kg



Obr. 9 - LWA 4P [6]



### 3 Požadavkový list

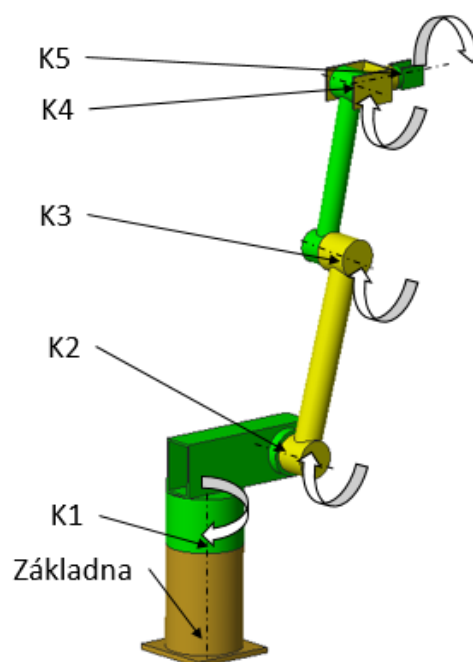
Tab. 5 - Požadavkový list

Požadavek	Parametr/popis
Prostředí	Zakrytá hala, vnitřní prostředí
	Prašné IP 40 / IP 50 (bez vody)
Operační teplota	10° - 30°
Struktura	Angulární (není podmínkou)
Počet stupňů volnosti (DoF)	5 až 6
Pohon	Elektrický
	V kloubu / mimo kloub
Otáčení posledního DoF	Min $\pm 180^\circ$
Otáčení prvního DoF	Min $\pm 180^\circ$
Hmotnost OM	1 až 2 kg
Maximální hmotnost manipulátoru	20 kg
Zrychlení	Max. $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
	Předpokládají se pomalé pohyby
Dosah	Na podložku
	Vertikálně 1,5 m od podložky
	K odkládacím nádobkám
Materiál	Hliník, ocel
	Polykarbonát (3D tisk)
Vzdálenost od kola (od podložky) k základně manipulátoru	500 mm

## 4 Varianty řešení

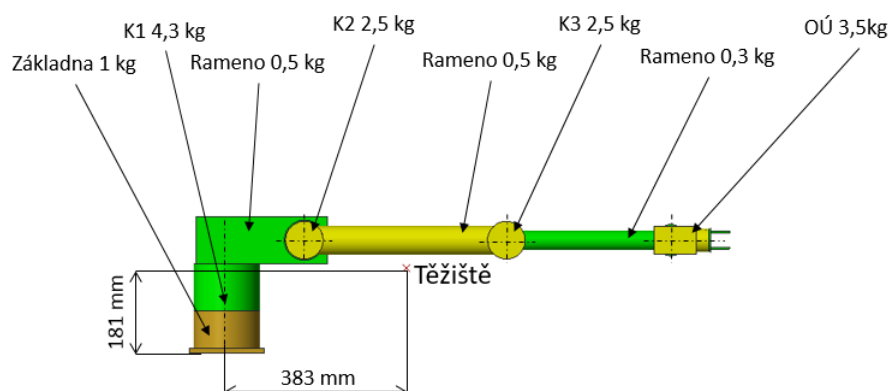
Byly vytvořeny tři varianty kinematických struktur manipulátoru. Rozměry a dosahy variant vychází z jednotlivých úkolů ERC soutěže.

### 4.1 Varianta A



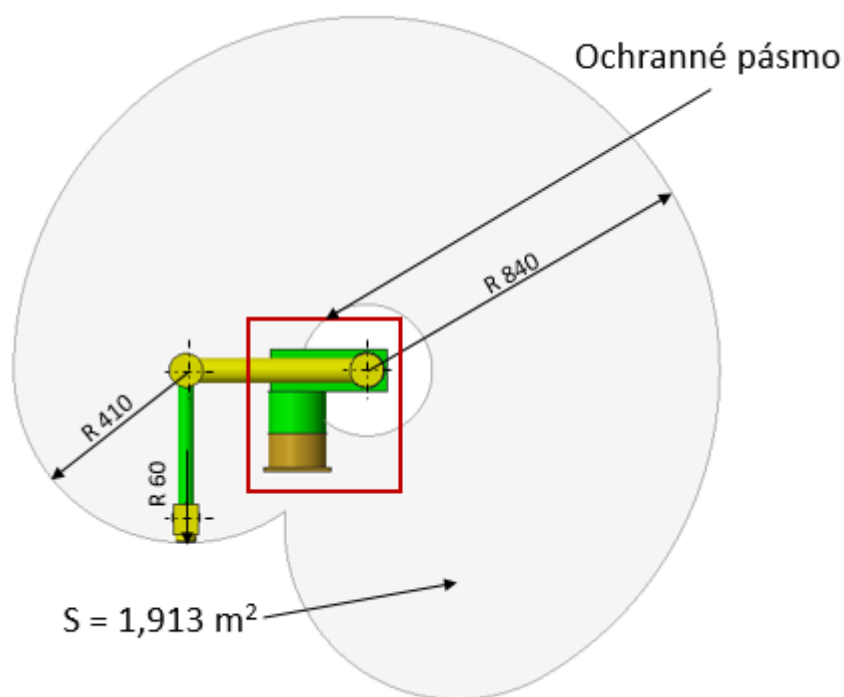
Obr. 10 - Varianta A

Manipulátor s pěti stupni volnosti. Veškeré klouby jsou rotační. Rameno je univerzální – bez zásahu do konfigurace dosáhne na podložku a do výšky 1,5 m od podložky. Na Obr. 11 je znázorněno rozložení teoretické hmotnosti a teoretická poloha těžiště při maximálním vyložení ramene.



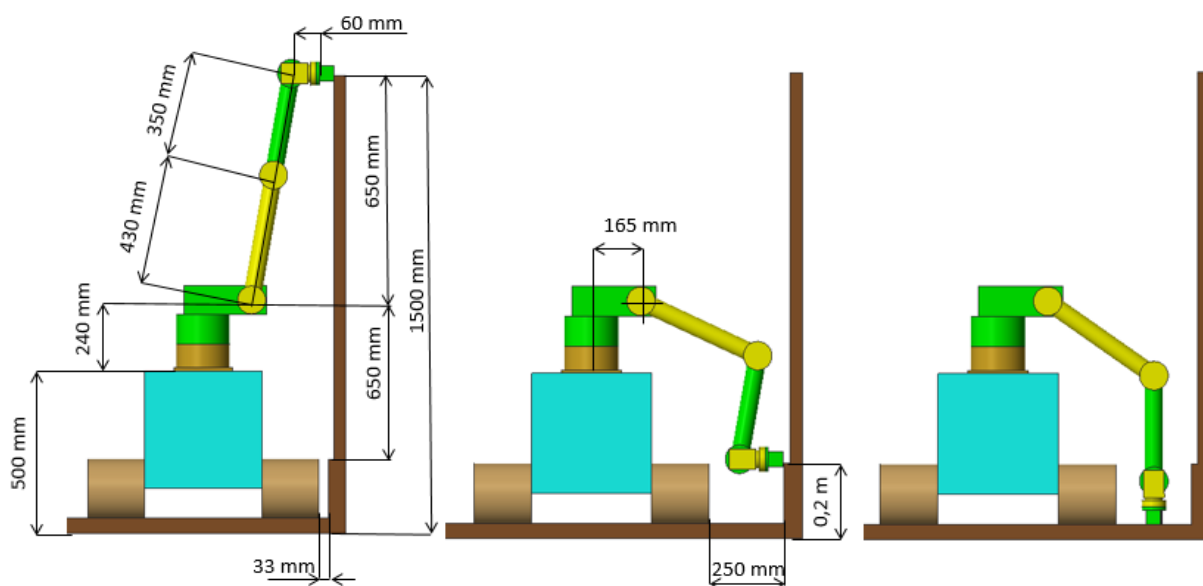
Obr. 11 - Rozložení hmotnosti varianty A

Pracovní prostor zasahuje i do rámu robotu, proto musí být softwarově vymezeno ochranné pásmo.



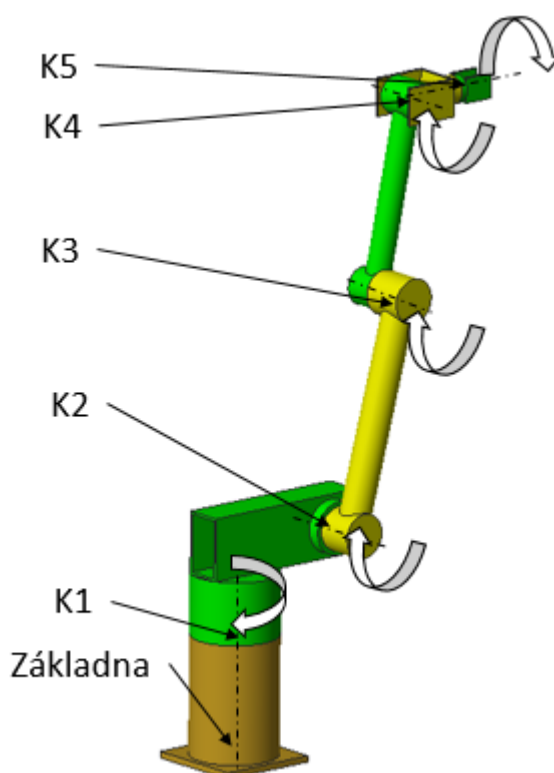
Obr. 12 - Pracovní prostor varianty A

Manipulátor bude umístěn na robotu ve výšce 500 mm. Na Obr. 13 jsou znázorněny osové vzdálenosti jednotlivých kloubů a dosahy do požadovaných pozic.



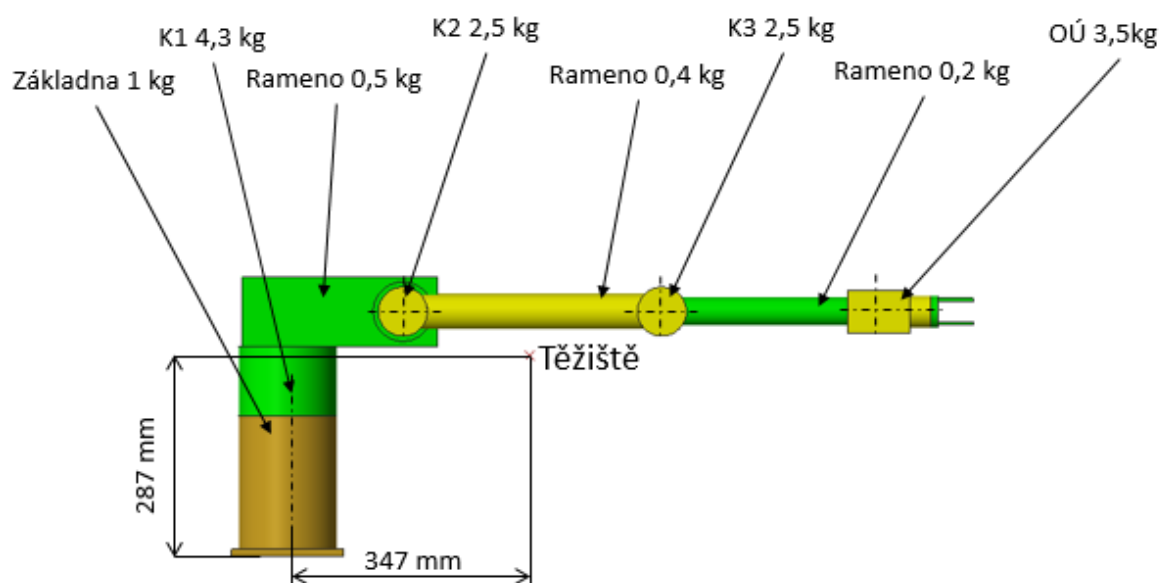
Obr. 13 - Dosahy varianty A

## 4.2 Varianta B



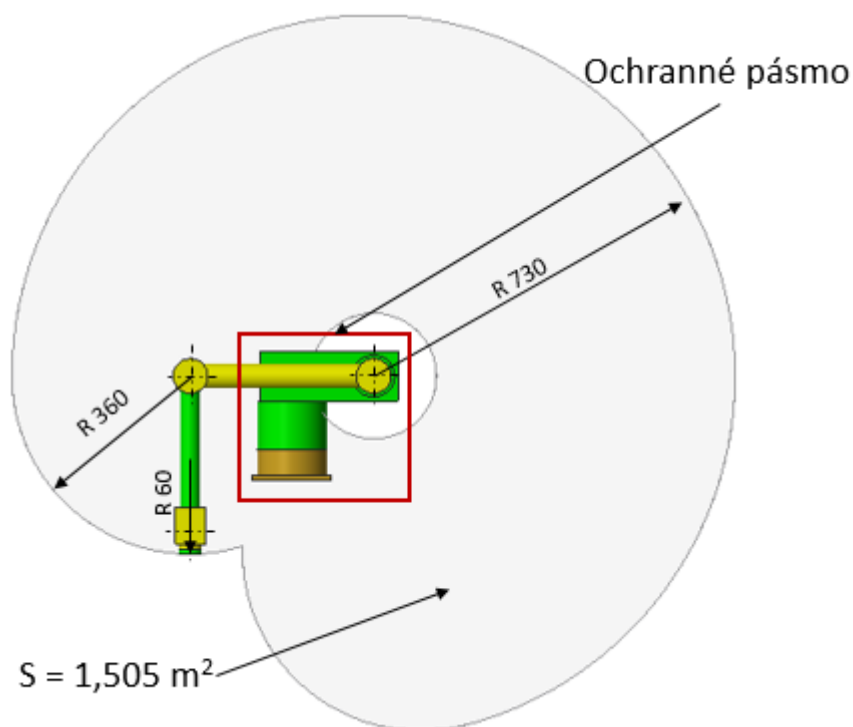
Obr. 14 - Varianta B

Manipulátor s pěti stupni volnosti. Veškeré klouby jsou rotační. Varianta je obdobná variantě A, ale už není tolik univerzální. Varianta disponuje vyměnitelnou základnu – tu je možno měnit mezi úlohami. S větší základnou manipulátor dosáhne do výšky 0,2 *m* až 1,5 *m* od podložky. S menší základnou rameno dosáhne na podložku.



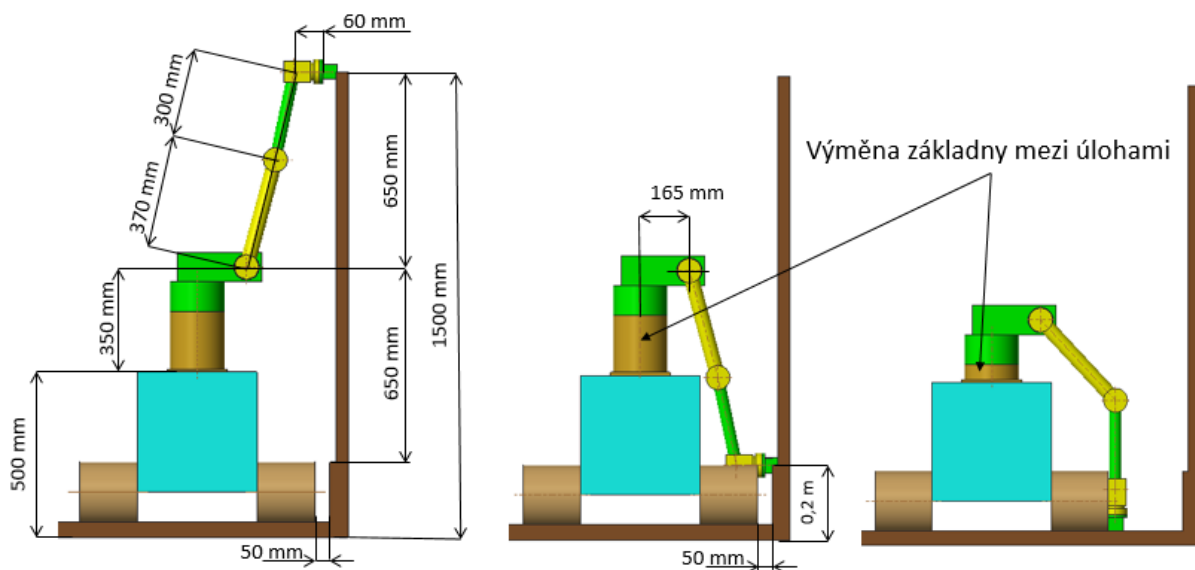
Obr. 15 - Rozložení hmotnosti varianty B

I u této varianty pracovní prostor zasahuje do rámu manipulátoru, je tedy nutné softwarové ochranné pásmo.



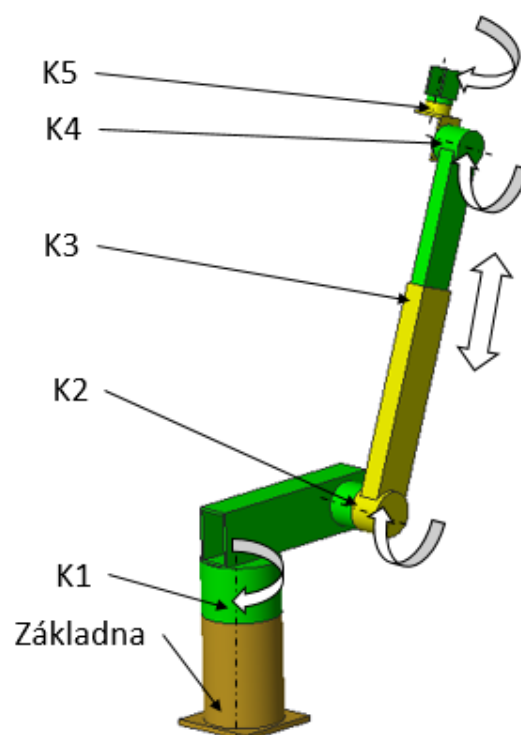
Obr. 16 - Pracovní prostor varianty B

Manipulátor bude umístěn na robotu ve výšce 500 mm. Na Obr. 13 jsou znázorněny osové vzdálenosti jednotlivých kloubů a dosahy do požadovaných pozic.



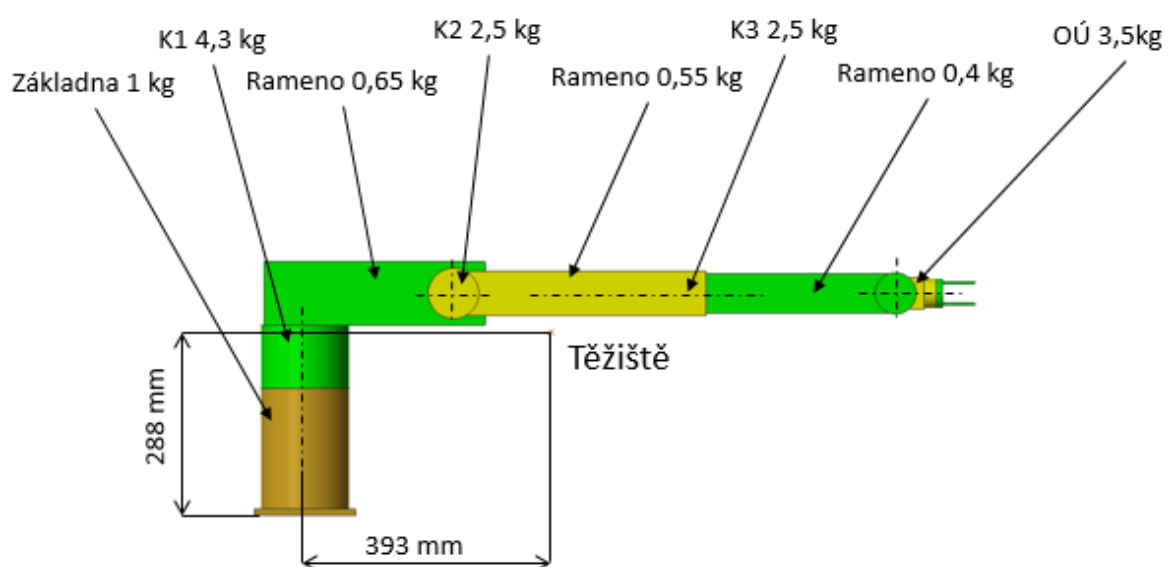
Obr. 17 - Dosahy varianty B

### 4.3 Varianta C



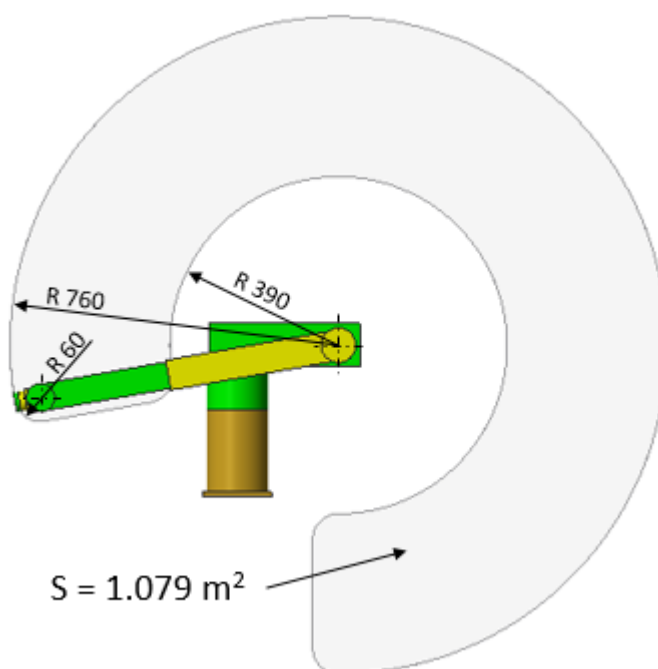
Obr. 18 - Varianta C

Manipulátor s pěti stupni volnosti. Kinematická struktura RRT. Varianta disponuje vyměnitelnou základnu. Podle typu základny rameno dosáhne do požadovaných pozic.



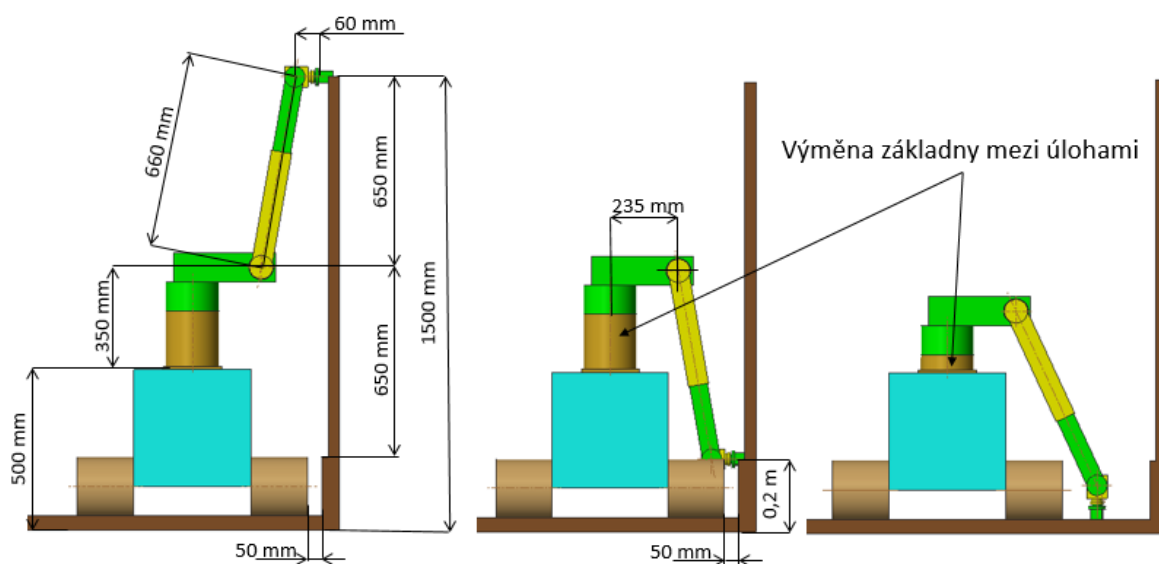
Obr. 19 - Rozložení hmotnosti varianty C

Pracovní prostor nezasahuje do rámu manipulátoru. Vysunutí translace je 250 mm.



Obr. 20 - Pracovní prostor varianty C

Manipulátor bude umístěn na robotu ve výšce 500 mm. Na Obr. 21 jsou znázorněny osové vzdálenosti jednotlivých kloubů a dosahy do požadovaných pozic.



Obr. 21 - Dosahy varianty C

## 4.4 Kriteriační analýza

Z navržených koncepcí manipulátorů bude jeden detailně rozpracován. Pro výběr optimální varianty bude použita kriteriační analýza. K posouzení byly určeny jednotlivá kritéria. Díky metodě porovnávání párů trojúhelníku a počtu voleb se určí váha významnosti jednotlivých kritérií. Dále zjistíme vážený index vynásobením jednotlivých bodů vahou významnosti. Tyto indexy se sečtou a porovnají.

### 4.4.1 Hodnocená kritéria

Tab. 6 - Hodnocená kritéria

Hodnocená kritéria	Název	Popis
1	Pracovní prostor	Velikost pracovního prostoru
2	Manipulační schopnost systému	Schopnost manipulace s OM
3	Předpokládaná hmotnost	Hmotnost systému
4	Dostupnost komponentů	Pro jednotlivé kinematické struktury
5	Předpokládaná poloha těžiště	Při plném vyložení manipulátoru

### 4.4.2 Stupnice hodnocení

Stupnice je vyznačena body od 3 do 1, podle počtu variant. Bod 3 je nejlepší stav, bod 1 je nejhorší stav.

Tab. 7 - Stupnice hodnocení

Stupnice hodnocení	
Vysoká úroveň	3
Průměrná úroveň	2
Nízká úroveň	1

### Významnost kritérií

Tab. 8 - Významnost kritérií

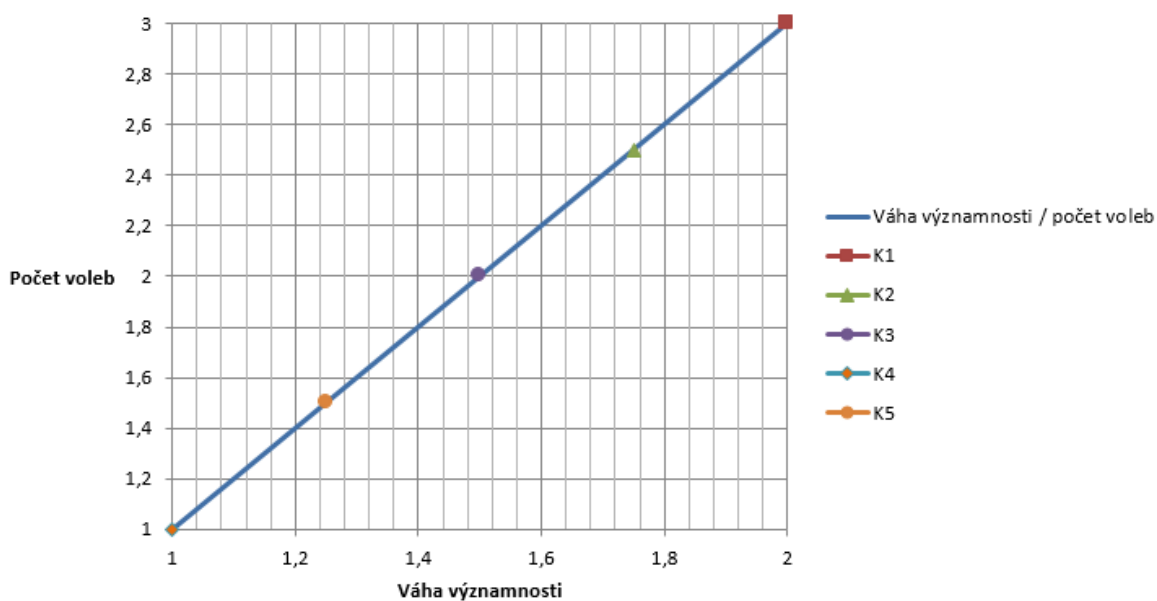
Významnost kritérií	
Nejvyšší	2
Nejnižší	1



#### 4.4.3 Metoda trojúhelníkových párů

Tab. 9 - Metoda trojúhelníkových párů

				Počet voleb v	Pořadí	Váha významnosti q
k1	k1	k1	k1	3	1	2
k2	k3	k4	k5			
	k2	k2	k2	2,5	2	1,75
	k3	k4	k5			
		k3	k3	2	3	1,5
		k4	k5			
			k4	1	5	1
			k5			
				1,5	4	1,25



Obr. 22 - Závislost počtu voleb a významnosti

#### 4.5 Hodnocení variant

Varianty byly hodnoceny podle stupnice hodnocení body 3 až 1, kde 3 je nejlepší stav, bod 2 průměrný stav a 1 je nejhorší stav.

#### 4.5.1 Varianta A

Tab. 10 - Hodnocení varianty A

	Hodnota	Významnost kritéria	Vážený index kritéria $I_{ij}^*$
k1	3	2	6
k2	2	1,75	3,5
k3	2	1,5	3
k4	2	1	2
k5	2	1,25	2,5
Celkový součet vážených indexů $I_{ij}^*$ varianty A:			<b>17</b>

K1 – Největší pracovní prostor

K2 – Kloub č. 3 je rotace – možnost dalšího naklopení

K3 – Systém s druhou nejmenší odhadovanou hmotností

K4 – Rotační komponenty jsou dostupnější než translační

K5 – Teoretická poloha těžiště je 2. nejbližší k ose rotace 1. kloubu

#### 4.5.2 Varianta B

Tab. 11 - Hodnocení varianty B

	Hodnota	Významnost kritéria	Vážený index kritéria $I_{ij}^*$
k1	2	2	4
k2	2	1,75	3,5
k3	3	1,5	4,5
k4	2	1	2
k5	3	1,25	3,75
Celkový součet vážených indexů $I_{ij}^*$ varianty B:			<b>17,75</b>

K1 – Druhý největší pracovní prostor

K2 – Kloub č. 3 je rotace – možnost dalšího naklopení

K3 – Systém s nejmenší odhadovanou hmotností

K4 – Rotační komponenty jsou dostupnější než translační

K5 – Teoretická poloha těžiště je nejbližší k ose rotace 1. kloubu

#### 4.5.3 Varianta C

Tab. 12 - Hodnocení varianty C

	Hodnota	Významnost kritéria	Vážený index kritéria $l_{ij}^*$
k1	1	2	2
k2	1	1,75	1,75
k3	1	1,5	1,5
k4	1	1	1
k5	1	1,25	1,25
Celkový součet vážených indexů $l_{ij}^*$ varianty C:			<b>7,5</b>

K1 – Nejmenší pracovní prostor

K2 – Kloub č. 3 je translace – pouze posunutí

K3 – Systém největší odhadovanou hmotností

K4 – Translační komponenty jsou nákladnější než rotační (kolejnice + vozík)

K5 – Teoretická poloha těžiště je nejdále od osy rotace 1. kloubu

#### 4.5.4 Vítězná varianta

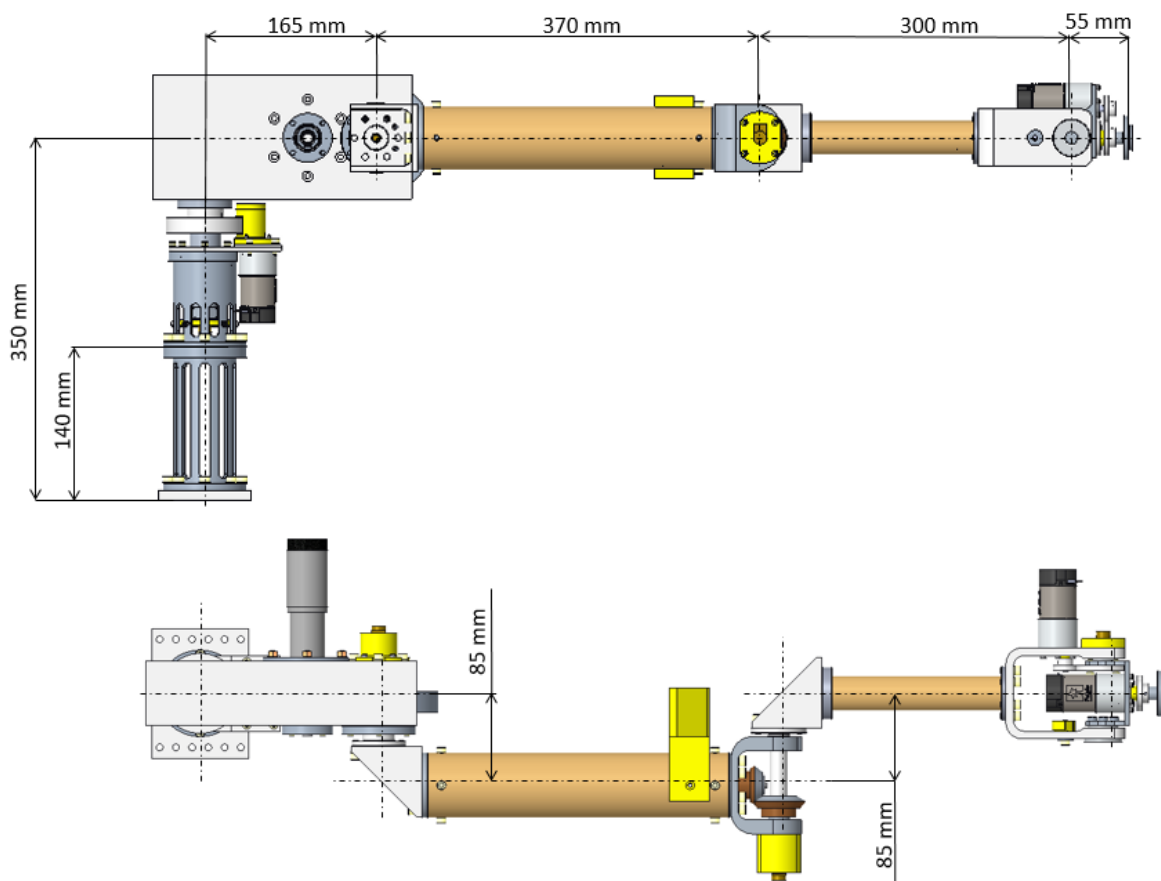
Podle kritériální analýzy je vítěznou variantou varianta B se součtem vážených indexů 17,75.

## 5 Mechanická část – návrh manipulátoru

Návrh manipulátoru byl proveden od posledního kloubu (K5) až po základnu. Cílem byla snaha dodržet osové vzdálenosti z koncepčního návrhu varianty B.

### 5.1 Manipulátor – celek

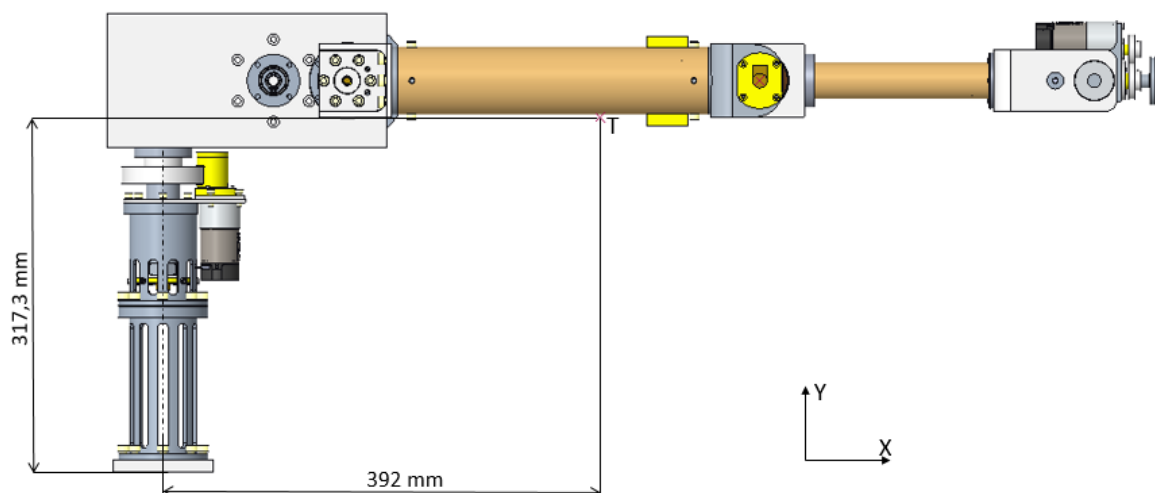
U výsledného konstrukčního řešení na Obr. 23 jsou znázorněny osové vzdálenosti manipulátoru. Kromě vzdálenosti od příruby k ose rotaci kloubu č. 5 byly veškeré rozměry dodrženy. Délka hřídele byla zmenšena o 5 mm z důvodu zmenšení klopného momentu. I přes zkrácení hřídele manipulátor dosáhne do požadovaných pozic.



Obr. 23 – Osově vzdálenosti manipulátoru

Celková hmotnost manipulátoru je 12,1 kg, včetně 2 kg zátěže (OM). V této hmotnosti ještě není zahrnutá kabeláž.

Poloha těžiště při plném vyložení se od koncepčního návrhu příliš neliší. V ose X je posunuta dále o cca 50 mm a v ose Y o 30 mm. Polohu těžiště je možno vidět na Obr. 24.

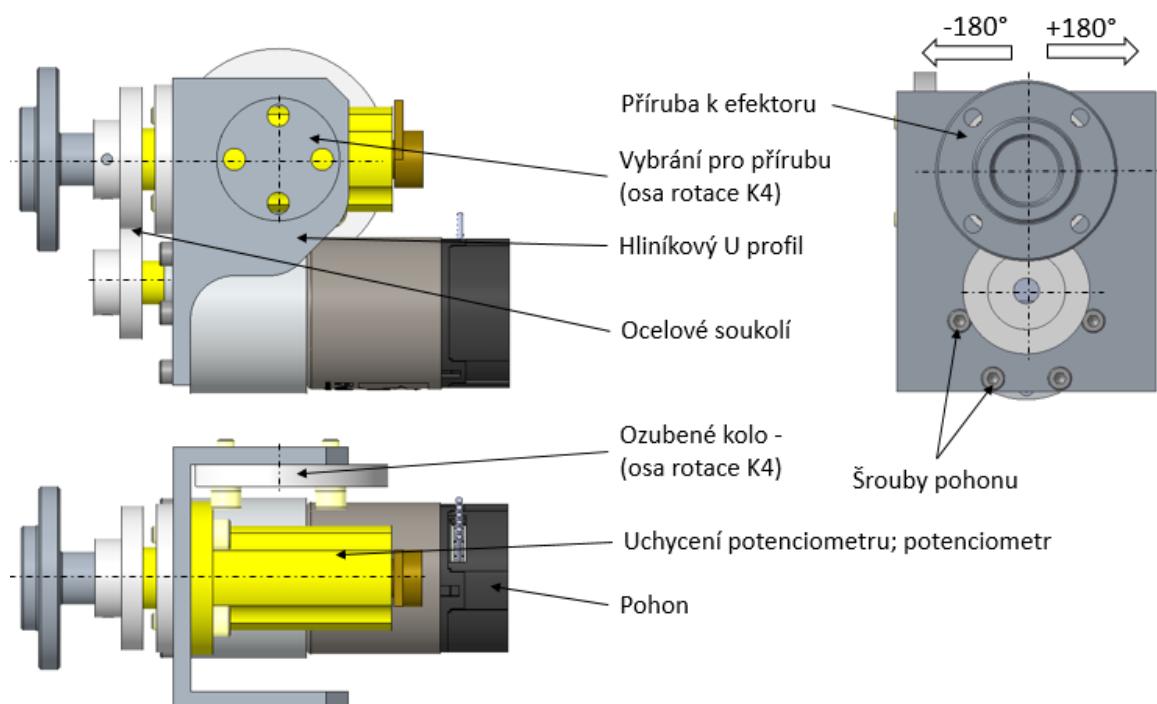


Obr. 24 – Poloha těžiště

## 5.2 Návrh kloubu K5

Poslední kloub (K5) musí otočit efektozem a tří fázovým vypínačem. Potřebný moment k otočení vypínače byl změřen pomocí siloměru a ramene. K otočení tří fázového vypínače je potřeba 0,904 Nm.

Na Obr. 25 je možno vidět konstrukční řešení K5. Poslední kloub má teoreticky neomezenou rotaci. Je limitován kabeláží, která povede k servu na efektozu. Rotace splňuje požadavek na minimální rotaci  $\pm 180^\circ$ .



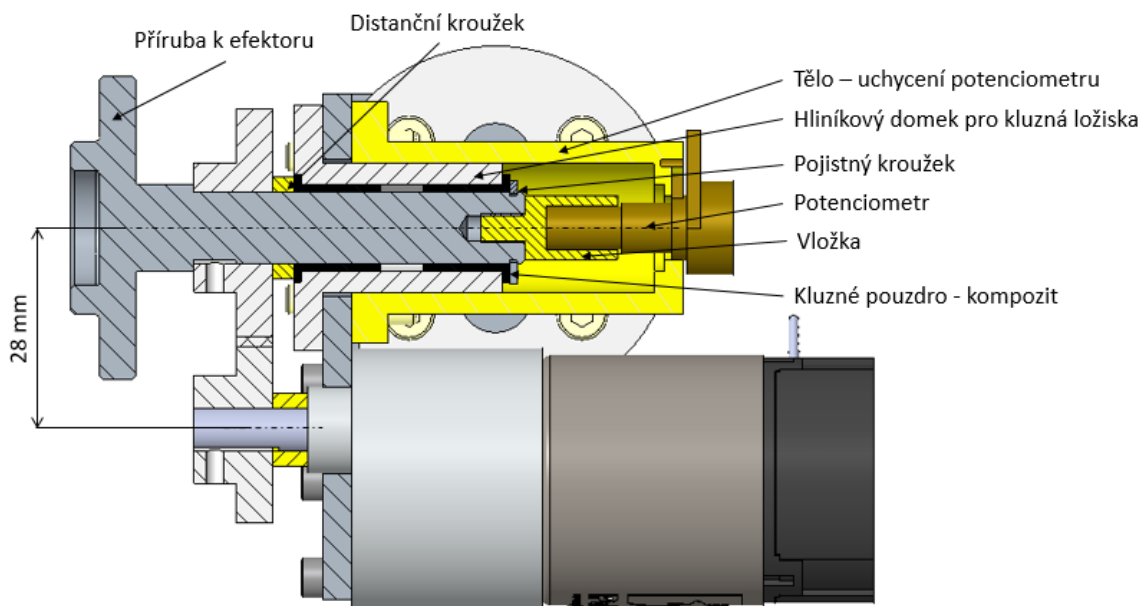
Obr. 25 – Návrh kloubu K5

Tělo K5 je hliníkový (EN-AW6060) U profil. K tělu je připevněn pohon a ložiskový domek, do kterého se vloží příruba, ke které bude přichycen efektor.

Hřídel je uložena v kluzných pouzdrech [7] a je zajištěna pojistným kroužkem proti axiálnímu posunutí, jak je možné vidět na Obr. 26. Moment z pohonu se přenáší pomocí ozubeného soukolí. Ozubená kola jsou připevněna na hřídelích pomocí červíků.

Hmotnost kloubu je 2,6 kg (včetně OM o hmotnosti 2 kg).

Byly použity kluzná pouzdra z kompozitu, pro nízké rychlosti a kývavé pohyby. Tyto pouzdra jsou odolná proti nečistotám a prachu. Jsou Bezúdržbová, samomazná.

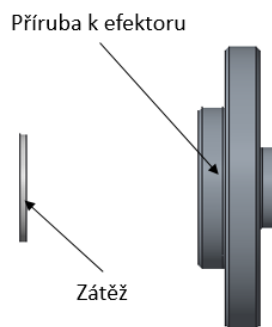


Obr. 26 – Kloub 5 v řezu

Do výstupní hřídele (příruba k efektoru) je vložen potenciometr pro zpětnou vazbu z kloubu. Potenciometr je uchycen ve vytištěném těle.

### 5.3 Návrh kloubu K4

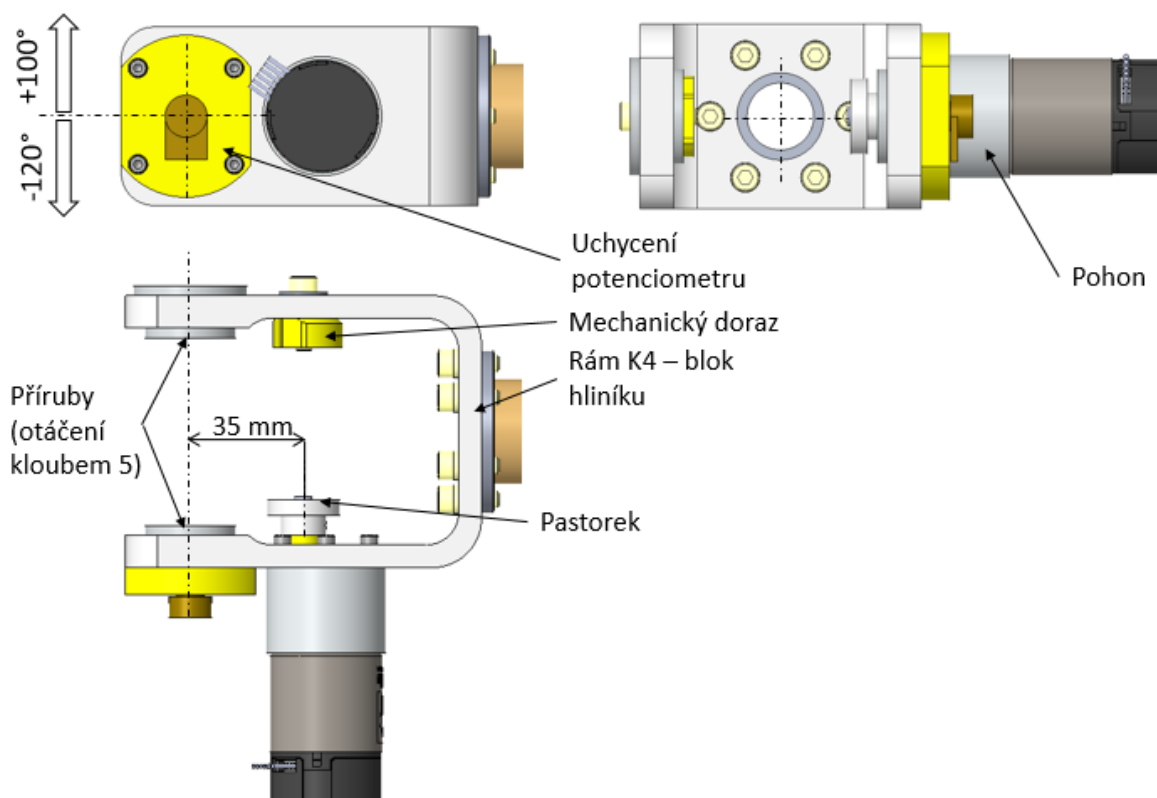
Tento kloub musí udržet celý kloub K5 s efektořem a OM. Těžiště efektoru s OM je simulováno jako závaží 2 kg vzdálené 30 mm od příruby K5.



Obr. 27 – Simulovaná zátěž

Pohon kloubu K4 musí překonat tíhové a setrvačné účinky.

Na Obr. 28 je možno vidět konstrukční řešení K4. Tělo K4 je vyrobeno z jednoho bloku hliníku EN AW-6063. Rotace je omezena na  $+100^\circ$  a  $-120^\circ$  z důvodů kolize těla K5 (hliníkový U profil). Aby nedošlo ke kolizi s hřídelí pohonu, kloub 5 se opře o mechanický doraz, který je připevněn na těle K4.



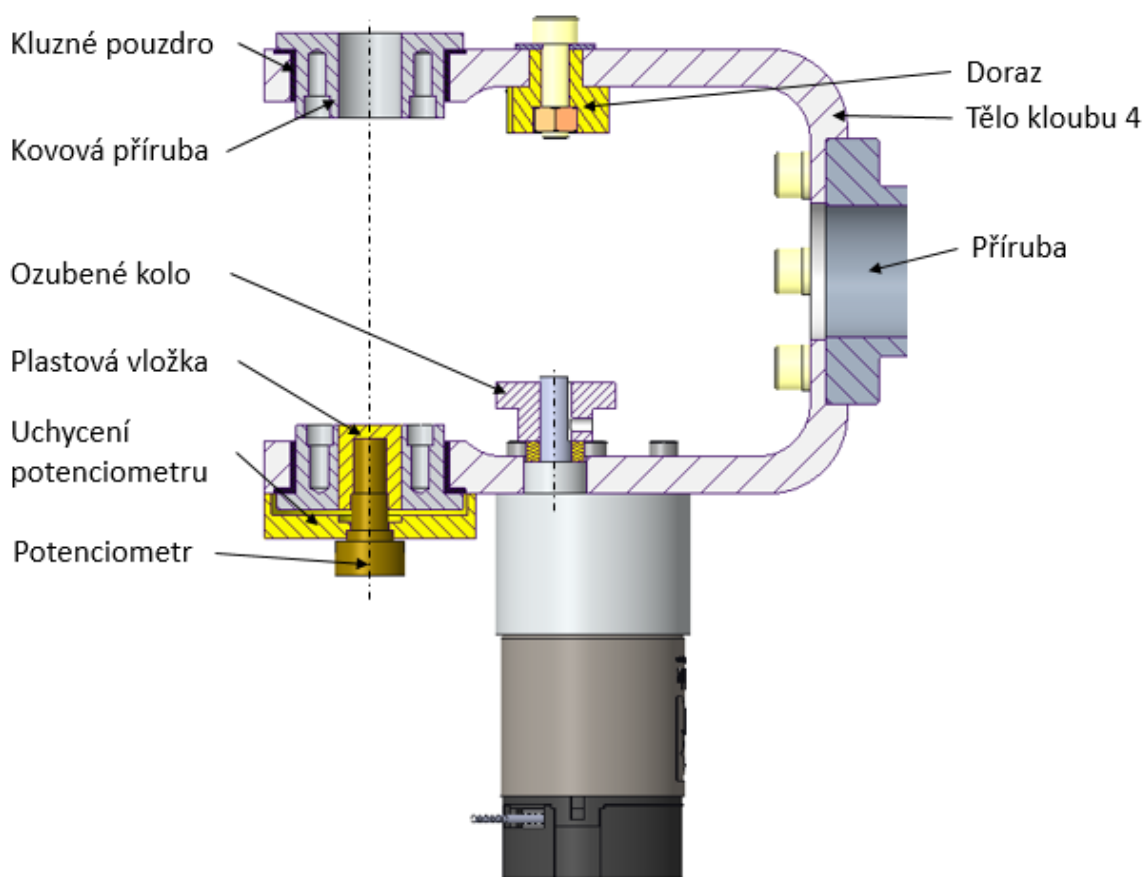
Obr. 28 – Návrh kloubu K4

Do těla K4 se vloží kluzná pouzdra [7]. Do pouzder se vloží kovové příruby, ke kterým se přišroubuje tělo K5. Na jedné straně je v přírubě vložka s potenciometrem pro zpětnou vazbu o poloze natočení.

Pohon je uchycen k tělu K4. Součástí pohonu je i enkodér. Pro kontrolu bude z kloubu dvojí zpětná vazba – jak z potenciometru, tak enkodéru. Kroutící moment se přenáší pomocí ocelového soukolí. Pastorek je připevněn na hřídeli motoru pomocí červíku. Větší ozubené kolo je uchyceno k tělu K5 pomocí šroubů. Pro vycentrování soukolí je větší ozubené kolo uchyceno v oválných dírách.

K tělu K4 je přichycena ocelová příruba pomocí šroubů. Na přírubu je nasunuta hliníková trubka a zajištěna šrouby. Trubka i příruba je dutá pro možnost vedení kabeláže vnitřkem profilu. Takto vedená kabeláž bude chráněna před okolím.

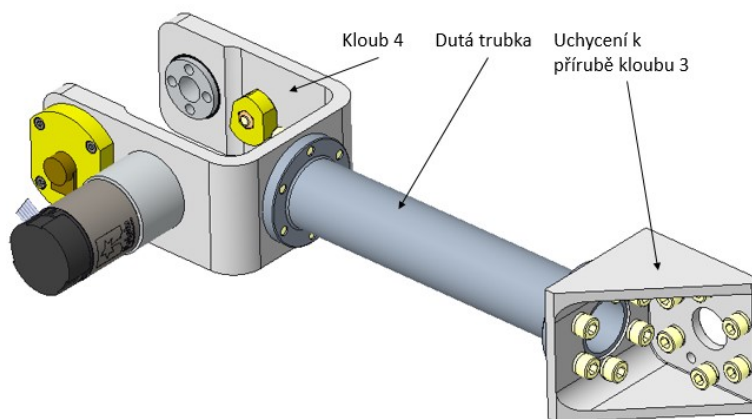
Hmotnost kloubu je 1,1 kg.



Obr. 29 – Kloub 4 v řezu

Kloub 4 je spojen s kloubem 3 pomocí duté hliníkové trubky. Tato trubka bude vyrobena z kulatiny hliníku EN AW-6063. Na koncích trubky jsou vyřezané závity pro uchycení. Vnitřním otvorem se povede kabeláž.



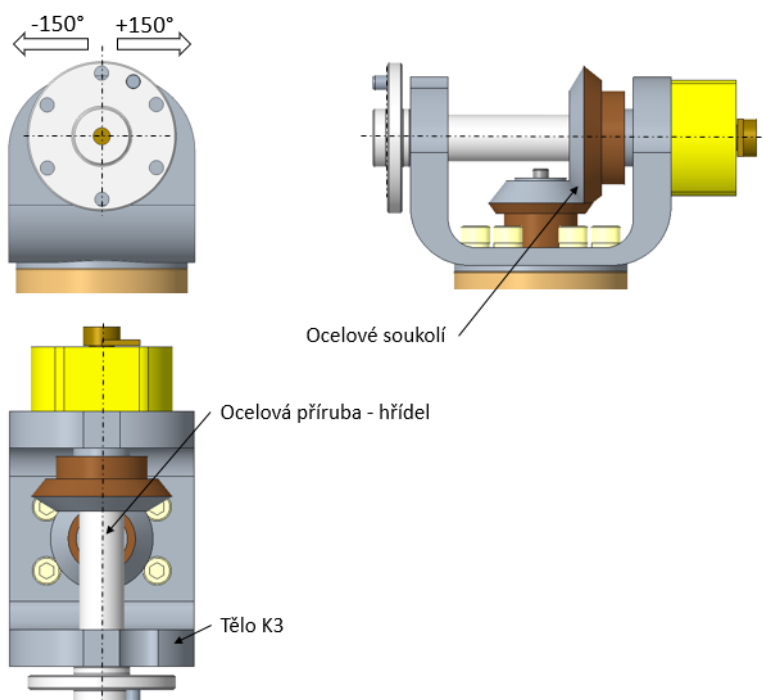


Obr. 30 – Spoj mezi kloubem 4 a 3

## 5.4 Návrh kloubu K3

Kloub 3 musí udržet orientační ústrojí (kloub 5 a 4) s efektořem a OM. Pohon kloubu musí překonat tíhové a setrvačné účinky.

Konstrukční řešení je možno vidět na Obr. 31. Tělo kloubu je vyrobeno z jednoho bloku hliníku EN AW-6063, obdobně jako kloub K4. Stejně jako u kloubu K5, i zde je teoreticky neomezená možnost rotace. Aby kloub 3 nenarazil do ostatních částí manipulátoru, je potřeba rotaci omezit. Na trubku, která spojuje kloub 2 s kloubem 3 je připevněn mechanický doraz, který rotaci omezí na  $\pm 150^\circ$ . Celkový rozsah kloubu je  $300^\circ$ , nedojde tedy k překroucení potenciometru.

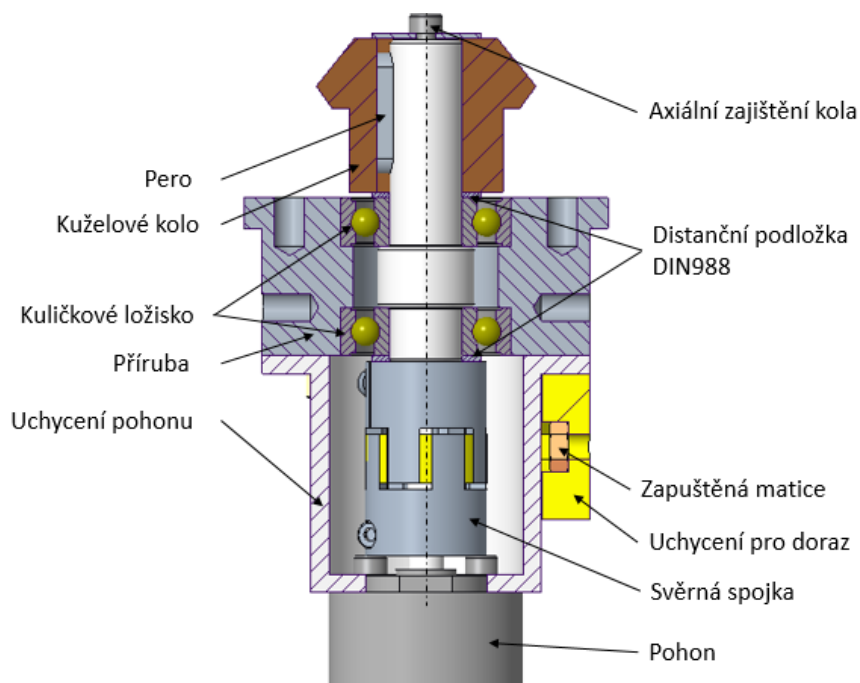


Obr. 31 - Návrh kloubu K3

Podsestava pohonu je vložena do hliníkové trubky. Tuto podsestavu je možné vidět na Obr. 32.

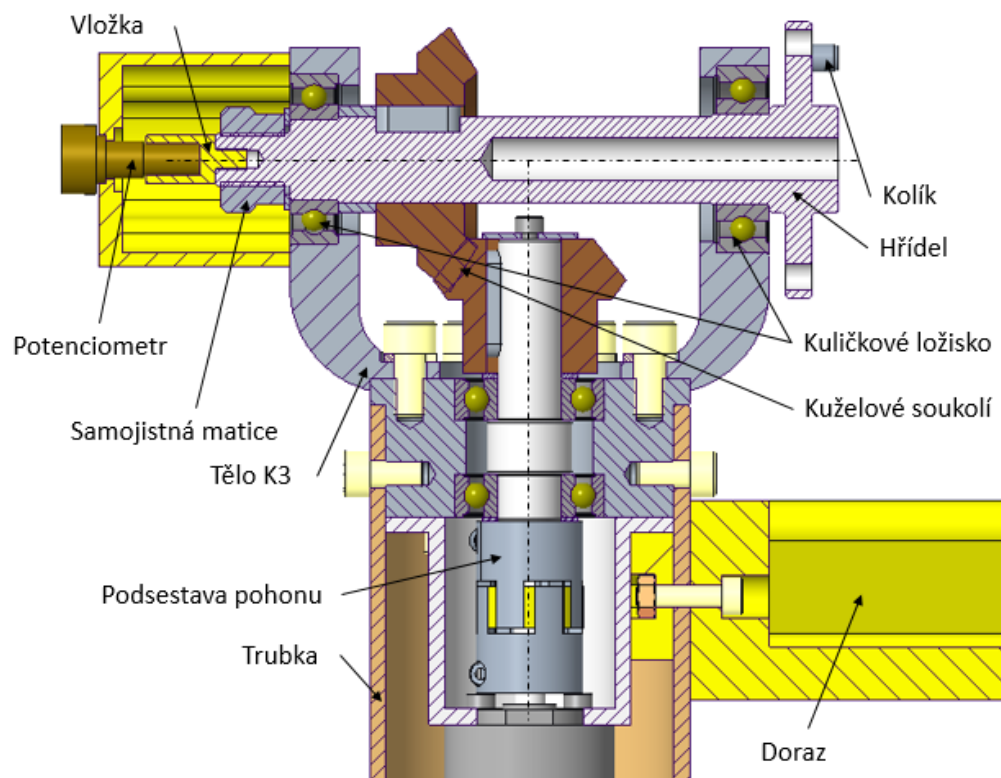
K motoru se přišroubuje uchycení pohonu. Na hřídel pohonu se připevní svěrná spojka. Do příruby se vloží kuličková ložiska a do nich se uloží hřídel. Krouticí moment se na hřídel přenáší pomocí svěrné spojky, která slouží i jako axiální zajištění. Uchycení pohonu a příruba jsou spojeny pomocí šroubů. Na uchycení pohonu je vložen plastový díl, který je osazen zapuštěnými maticemi, pro uchycení mechanického dorazu.

Na hřídel je připevněno kuželové kolo. Krouticí moment je přenášen pomocí pera. Kolo je axiálně zajištěno pomocí podložky a šroubu.



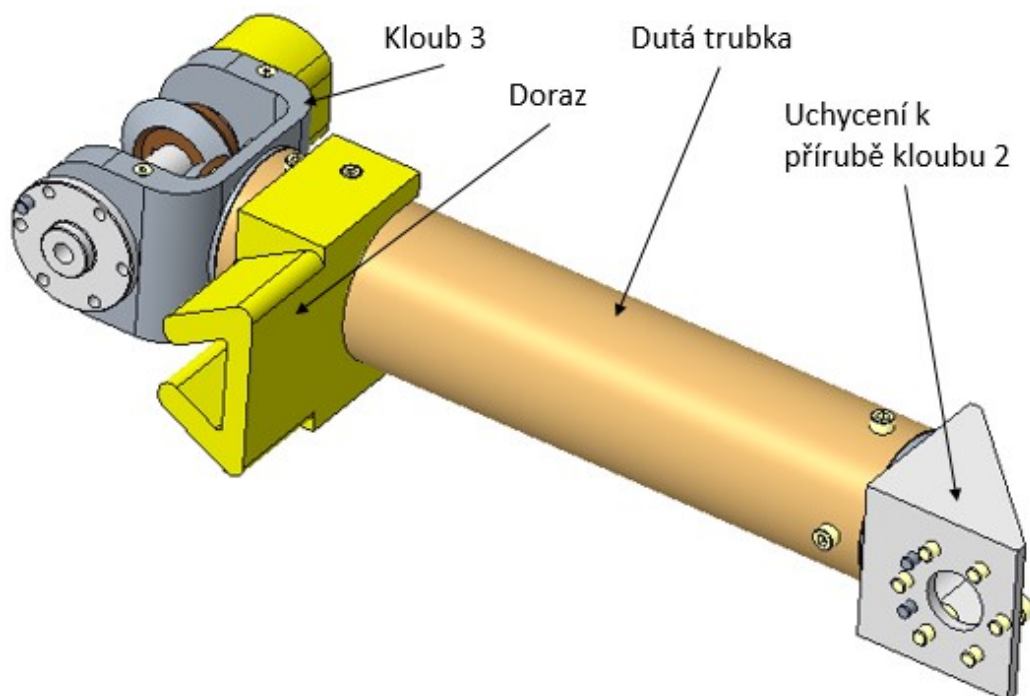
Obr. 32 – Podsestava pohonu

Do těla K3 jsou umístěny dvě kuličková ložiska, ve kterých se otáčí hřídel. Na hřídeli je umístěné kuželové ozubené kolo, krouticí moment se přenáší pomocí pera. Do hřídele je vložen potenciometr pro zpětnou vazbu o natočení kloubu. Hřídel je axiálně zajištěn samojistící maticí.



Obr. 33 – Kloub 3 v řezu

Hmotnost kloubu 3 je 2,65 kg.



Obr. 34 – Spoj mezi kloubem 2 a 3

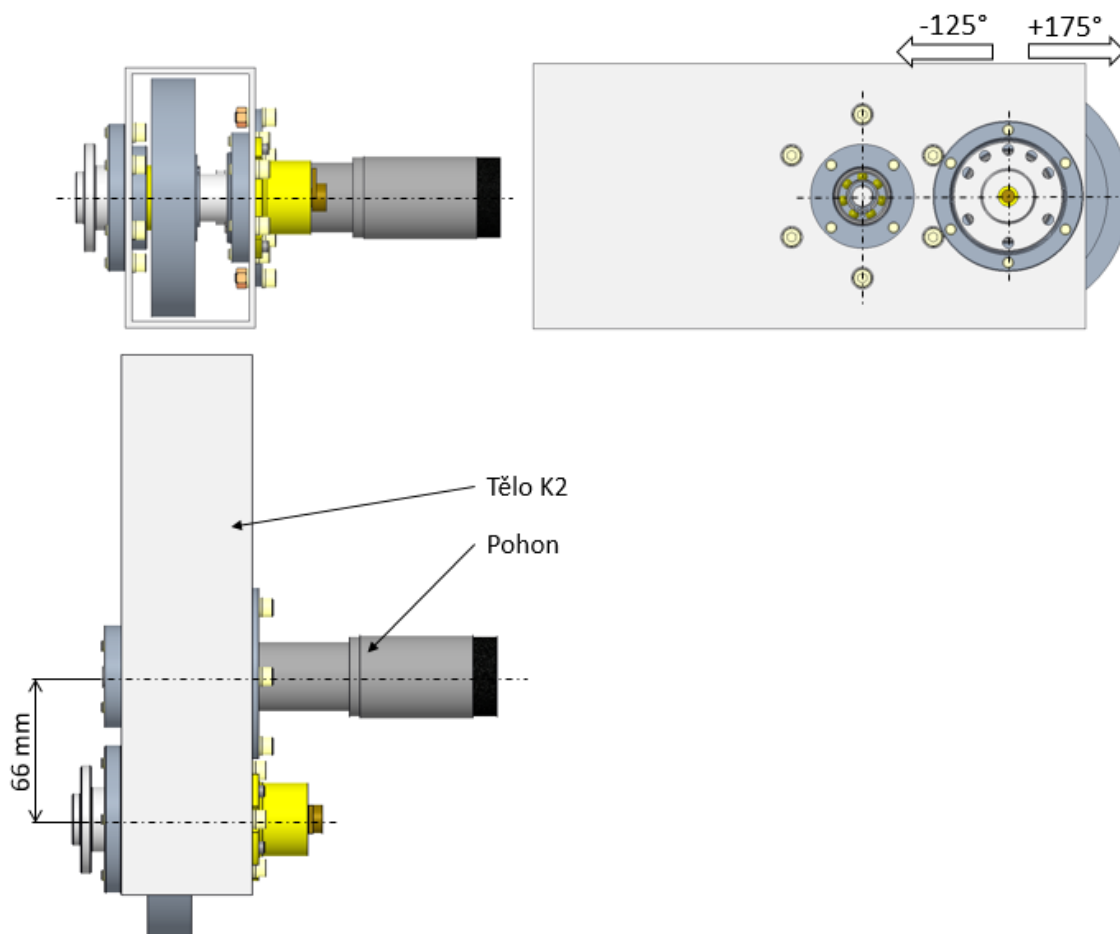
## 5.5 Návrh kloubu K2

Tento kloub je nejvíce namáhaný. Pohon musí překonat setrvačné a gravitační účinky kloubů K5, K4, K3, efektoru a OM. Konstrukční řešení je možno vidět na Obr. 35. Rotace kloubu je omezena na rozsah  $-125^\circ$  až  $+175^\circ$  z důvodu možné kolize s rámem mobilního robota.

Tělo kloubu je vyrobeno z dutého hliníkového čtyřhranného profilu.

Krouticí moment je přenášen z pohonu na přírubu ocelovým soukolím. Pastorek je přichycen na hřídeli, která je z jedné strany uložena v kuličkovém ložisku. Na druhé straně je uchycena na hřídel pohonu pomocí svěrné příruby ve tvaru „D“ viz Obr. 36.

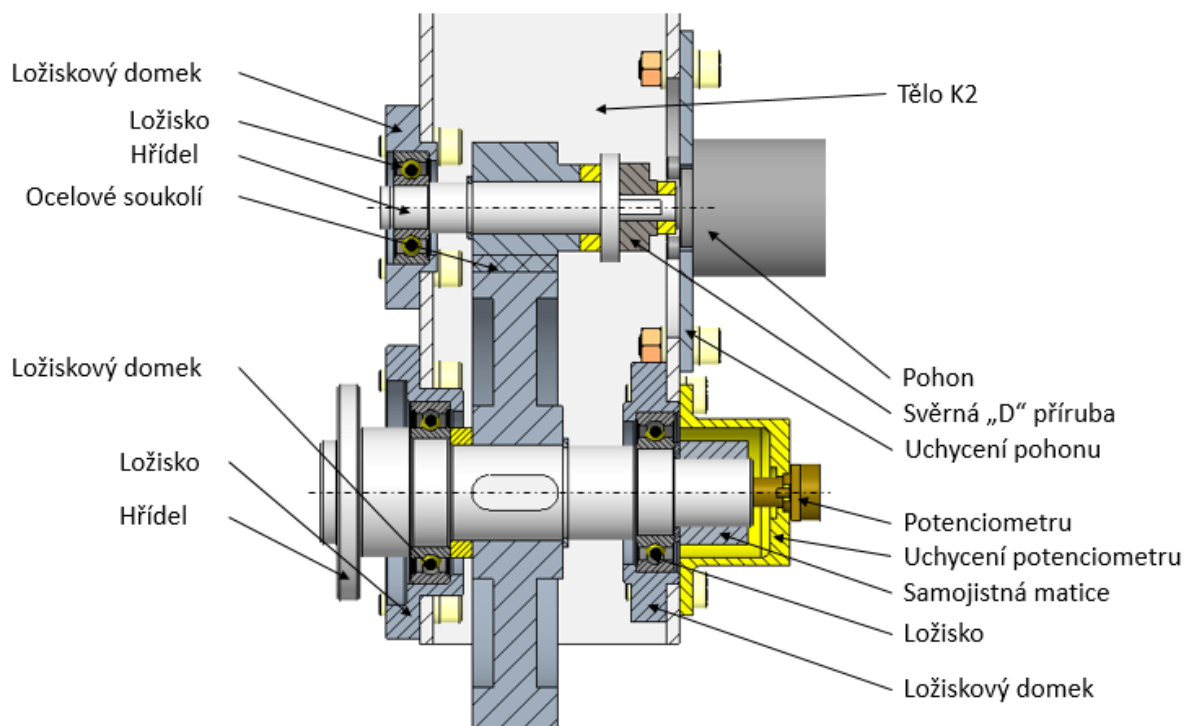
Velké ozubené kolo je přichyceno na hřídeli, která se otáčí ve dvou kuličkových ložiscích. Ložiska jsou uloženy v ložiskových domcích, které jsou přišroubovány k tělu K2.



Obr. 35 – Návrh kloubu K2

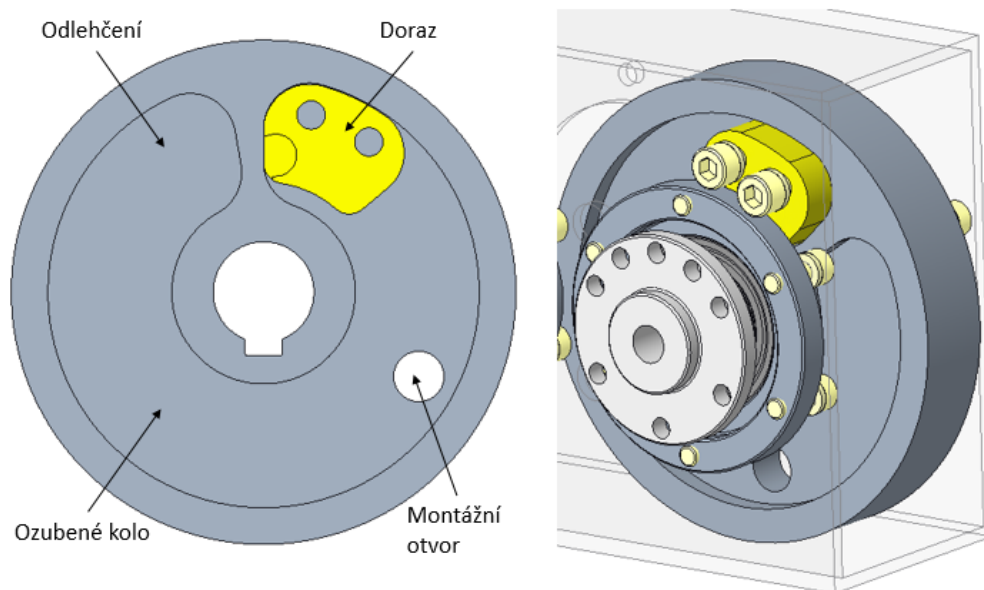
Do výstupní hřídele je vložen potenciometr pro zpětnou vazbu o poloze natočení.

Hmotnost kloubu jsou 3 kg.



Obr. 36 – Kloub 2 v řezu

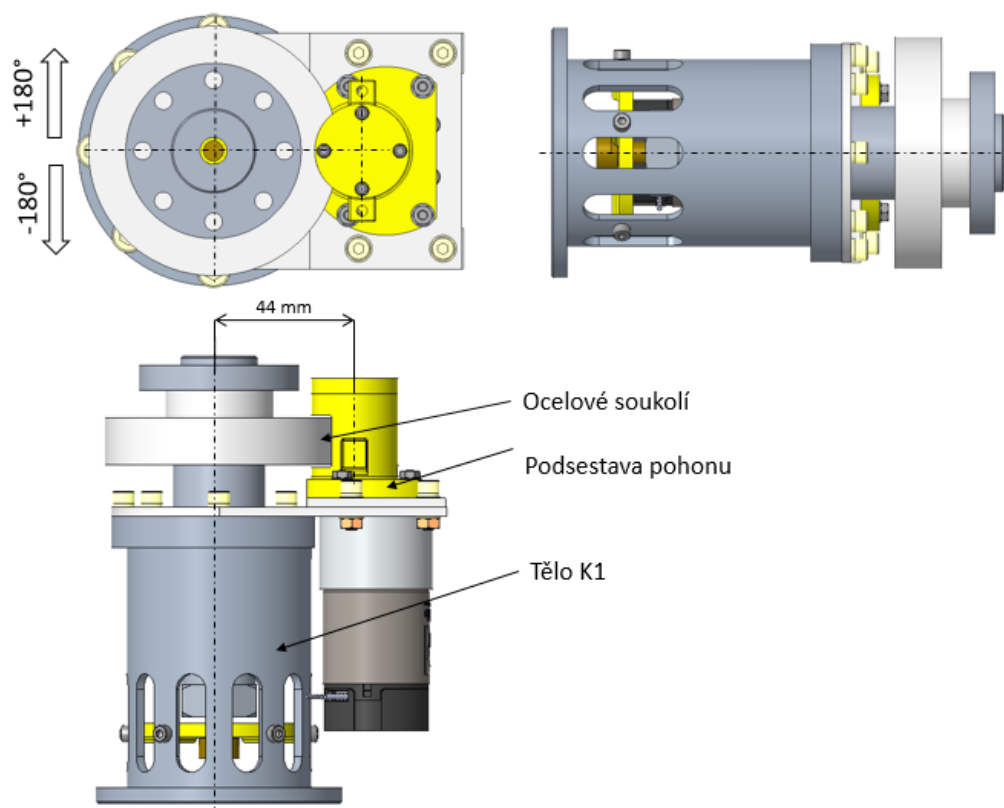
Omezení rozsahu pohybu je provedeno vybráním na ozubeném kole. Kolo se opře o doraz, který je přichycen k tělu K2.



Obr. 37 – Doraz kloubu 2

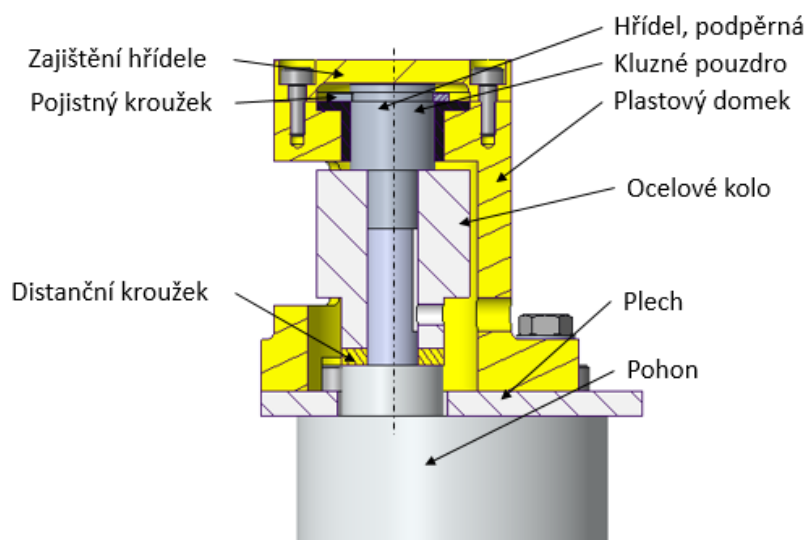
## 5.6 Návrh kloubu K1

Pohon kloubu musí překonat pouze setrvačné účinky ramene. Klopné momenty zachytí ložiska. Kloub otáčí celým ramenem v rozsahu  $\pm 180^\circ$ . Rozsah je možno zvětšit, podle možnosti zkroucení kabeláže.



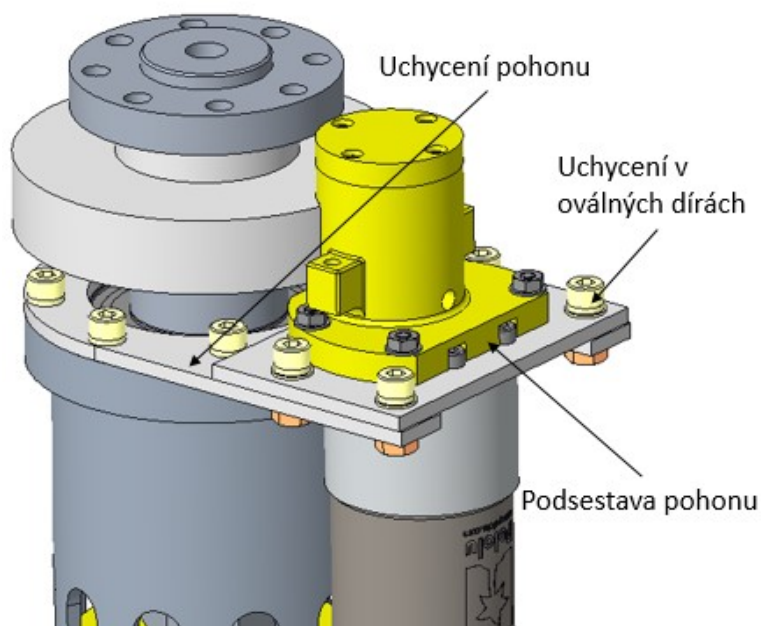
Obr. 38 – Návrh kloubu K1

Pohon je uchycen k plechu a z druhé strany je přichycen plastový domek. V domku je ozubené kolo, přichycené na hřídel pohonu pomocí červíku. Z druhé strany je ozubené kolo podepřeno malou hřídelí, která je uložena v kluzném pouzdru. Hřídel je zajištěna pojistným kroužkem a plastovou krytkou, přišroubovanou k plastovému domku.



Obr. 39 – Podsestava pohonu

Podsestava pohonu se připevní pomocí šroubů k plechu – „Uchycení pohonu“ viz. Obr. 40. V tomto plechu jsou oválné díry, díky kterým je možno vycentrovat uložení ozubení.

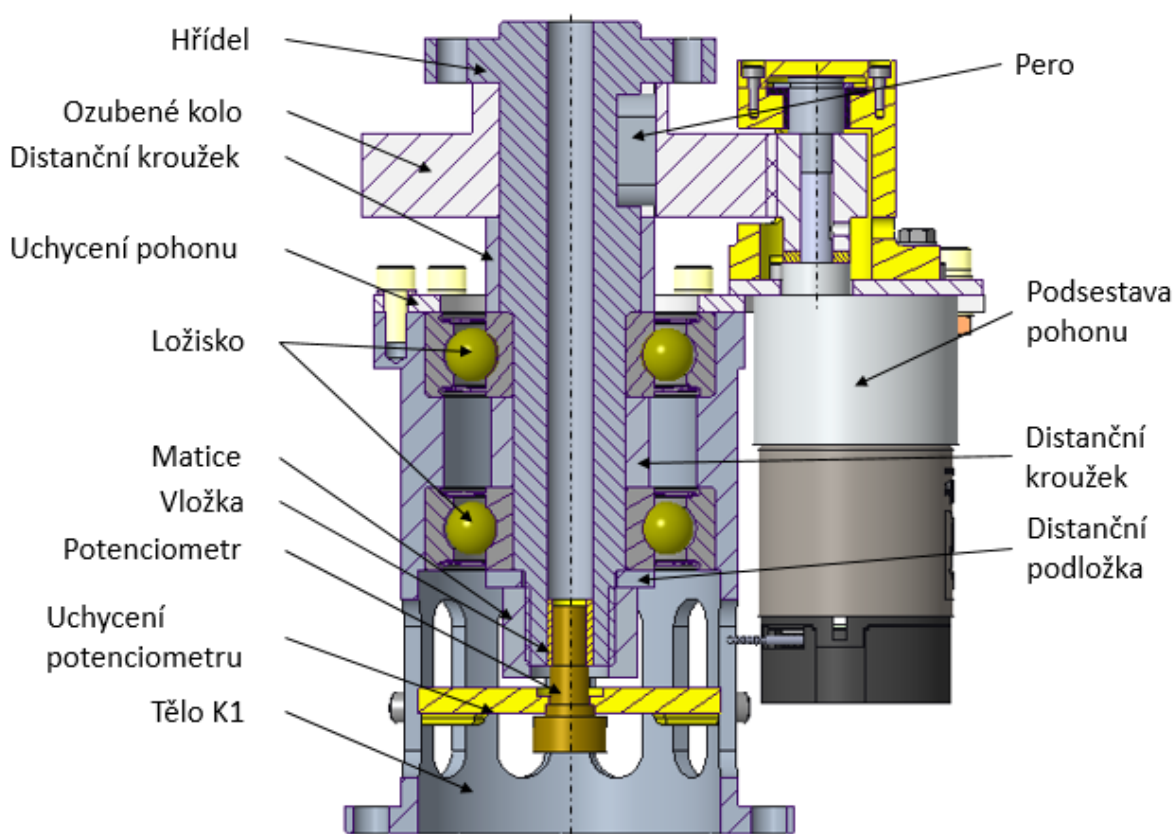


Obr. 40 – Uchycení pohonu

Tělo K1 je vyrobeno z kulatiny hliníku EN AW-6063. V těle jsou uložena dvě ložiska, ve kterých je vložena hřídel. Hřídel je zajištěna samojistící maticí proti axiálnímu posunutí. Do hřídele je vložen potenciometr pro zpětnou vazbu natočení. Na hřídeli je umístěné velké ozubené kolo.



Hmotnost kloubu je 2 kg.



Obr. 41 – Kloub 1 v řezu

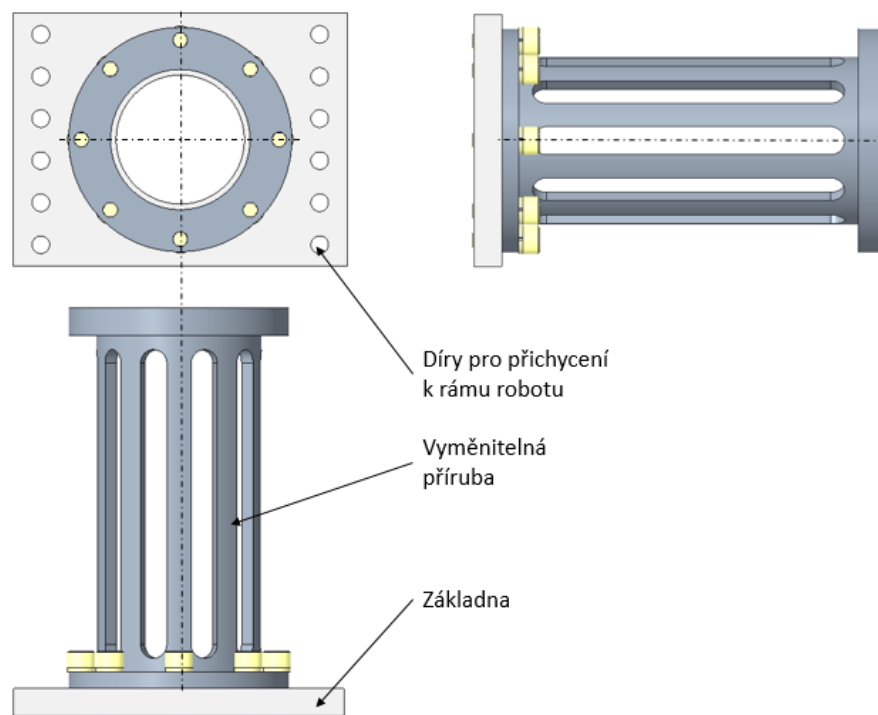
## 5.7 Základna

Základna slouží pro uchycení manipulátoru k robotu a pro nastavení výšky manipulátoru pro úlohu „obsluha panelu“. Základna je vyrobena z hliníkové desky EN AW-6063, vyměnitelná příruba je vyrobená z hliníkové kulatiny EN AW-6063.

Do hliníkové desky jsou vyvrtané díry pro přichycení k robotu. Manipulátor bude připevněn na plošinu z hliníkových profilů od Haberkornu.

Hmotnost základny včetně vyměnitelné příruby je 0,55 kg.



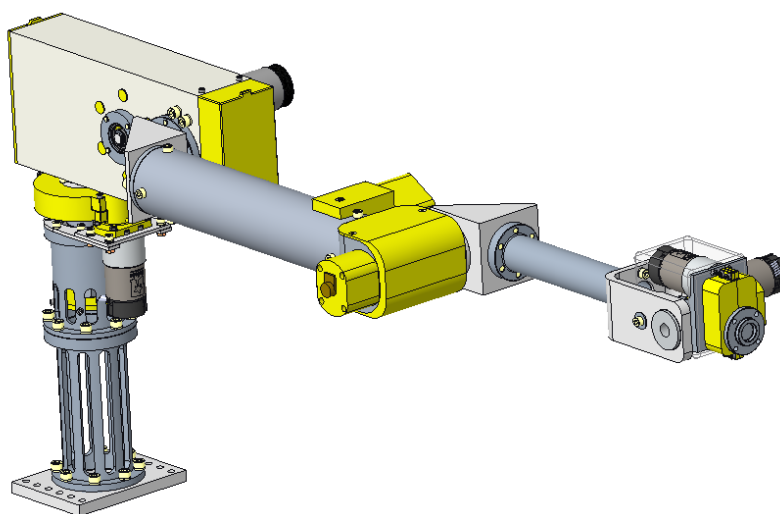


Obr. 42 – Základna

## 5.8 Krytování

Zakrytovat je nutné rotující části. Na ozubené převody bude aplikováno mazivo pro ozubená kola Kim-Tec [8]. Toto mazivo vytvoří na ozubení silně přilnavý film, který chrání ozubení před rázy, neváže na sebe prachové částice a je odolný vůči vodě a chladu. Je vhodné pro otevřené převody.

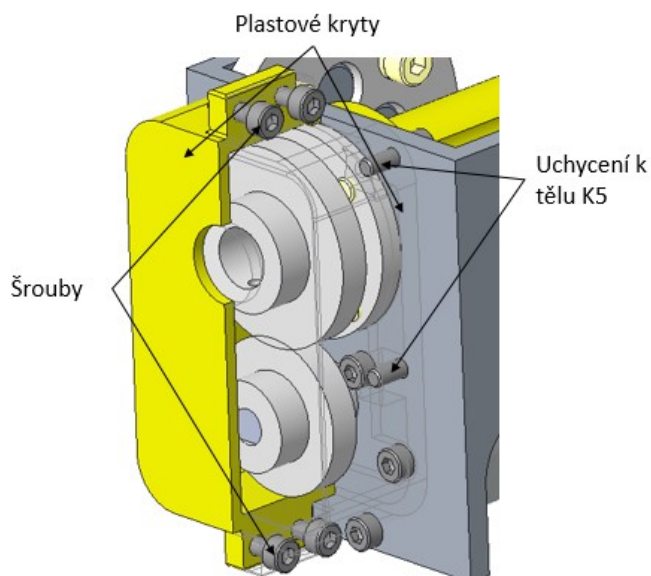
I přes použití tohoto maziva, ozubené převody budou zakrytovány.



Obr. 43 – Manipulátor s krytováním

### 5.8.1 Krytování kloubu 5

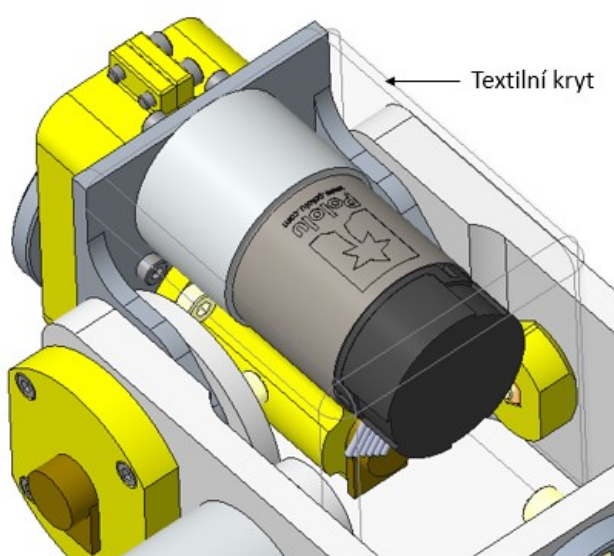
Plastový, dvoudílný kryt je přichycen k tělu K5 pomocí šroubů. Kryty jsou navíc sešroubovány ještě k sobě.



Obr. 44 – Kryt K5

### 5.8.2 Krytování kloubu 4

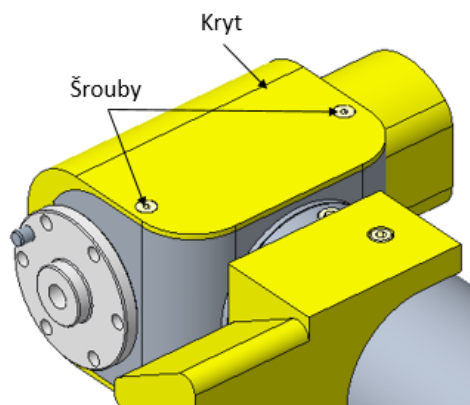
Kolem ozubeného soukolí není moc místa a pokud zde místo je, je tvarově složité. Proto tato část bude zakryta textilním krytem.



Obr. 45 – Kryt K4

### 5.8.3 Krytování kloubu 3

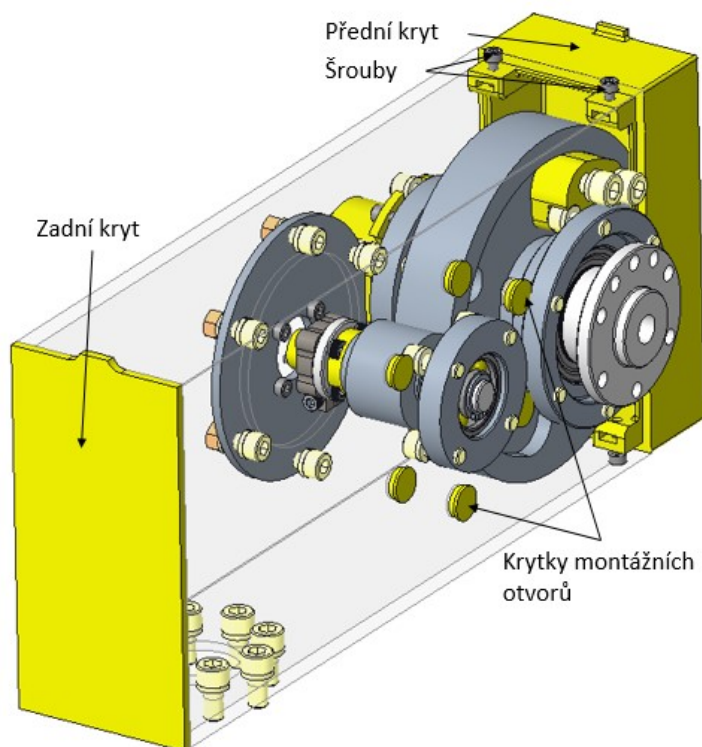
Kryt pro kloub 3 bude vyroben 3D tiskem v jednom kuse. Nasune se na tělo K3 a přišroubuje se.



Obr. 46 – Kryt K3

### 5.8.4 Krytování kloubu 2

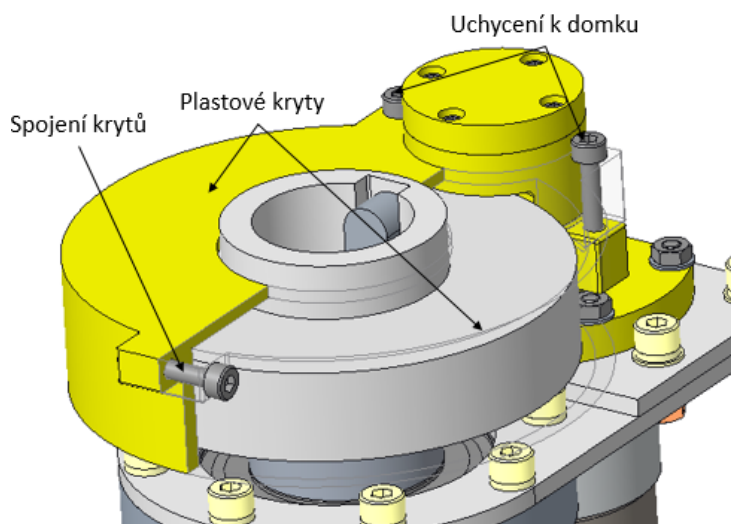
Přední kryt musí být trochu vysunutý, aby zakryl ozubené kolo. Tento kryt se přišroubuje k tělu K2. Zadní kryt a krytky montážních děr budou do otvorů zasunuté. Musí se vytisknout s mírným přesahem.



Obr. 47 – Kryt K2

### 5.8.5 Krytování kloubu 1

Kryt se skládá ze dvou částí. Kryty se připevní pomocí šroubů k plastovému domku. V zadní části jsou tyto kryty spojeny šroubem.



Obr. 48 – Kryt K1

## 6 Hardwarová část – výběr komponent

V této kapitole budou vybrány HW komponenty pro manipulátor. Jedná se o motory, senzory polohy a enkodéry.

### 6.1 Výběr pohonů

Pro kloub č. 5, 4 a 1 byl vybrán motor s převodovkou Metal Gearmotor 37Dx73L [9] od Pololu. Tento pohon se dodává s enkodérem.



Obr. 49 – Pohon kloubu č. 5,4 a 1 [9]

Tab. 13 – Parametry pohonu Pololu [9]

Parametr	Hodnota/popis
Napájení	12 V
Proud	5 A (špička)
Kroutící moment	1,76 Nm
Rozlišení enkodéru	64 pulsů / otáčku motoru
Cena	832 Kč

Pro kloub č. 3 byl vybrán pohon 60RPM Premium Gear Motor od Servocity [10]. Tento pohon se dodává s převodovkou a enkodérem.



Obr. 50 – Pohon kloubu 3 [10]

Tab. 14 – Parametry pohonu kloubu 3 [10]

Parametr	Hodnota/popis
Napájení	12 V
Proud	20 A (špička)
Kroutící moment	13 Nm
Rozlišení enkodéru	12 pulsů / otáčku motoru
Cena	1 250 Kč

Pro kloub č. 2 byl vybrán rovněž pohon od Servocity [11], ale vyšší řady. Tento pohon se dodává s převodovkou a enkodérem.



Obr. 51 – Pohon kloubu 2 [11]

Tab. 15 – Parametry pohonu klouby 3 [11]

Parametr	Hodnota/popis
Napájení	12 V
Proud	20 A (špička)
Kroutící moment	15 Nm
Rozlišení enkodéru	12 pulsů / otáčku motoru
Cena	1 250 Kč

## 6.2 Výběr kontrolérů

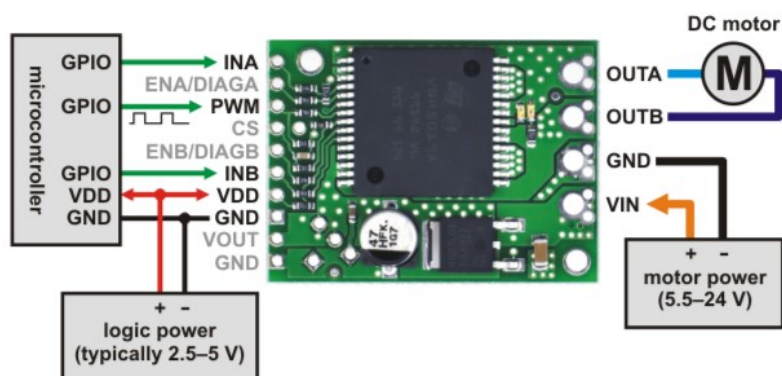
Byl vybrán kontrolér pro DC motory od pololu. Tento kontrolér bude ovládat pohony v kloubech. Každý pohon bude mít svůj vlastní kontrolér. Kontrolér musí zvládnout špičkové proudy (max 20A).



Obr. 52 – Motor kontrolér [12]

Tab. 16 – Parametry motor kontroléru [12]

Parametr	Hodnota/popis
Napájení	2,5 až 5 V
Proud	12 A (30 A špička)
Provozní frekvence	20 kHz
Cena	520 Kč



Obr. 53 – Znázornění zapojení kontroléru [12]

### 6.3 Výběr potenciometrů

Potenciometry budou použity pro zpětnou vazbu o poloze natočení jednotlivých kloubů. Hřídelky potenciometru budou zasunuty v plastových dílech, které budou zašroubované ve výstupních hřídelích kloubů.

Poslední a první kloub nemá omezenou rotaci, proto zde budou použity víceotáčkové potenciometry.



Obr. 54 – Víceotáčkový potenciometr [13]

Tab. 17 – Parametry víceotáčkového potenciometru [13]

Parametr	Hodnota/popis
Rozsah	5 otáček (1 800°)
Odpor	10 kOhm
Průměr osy	6,3 mm
Cena	135 Kč

Ostatní klouby jsou omezeny na rozsah pohybu 300°, zde budou použity klasické odporové potenciometry.



Obr. 55 – Odporový potenciometr [14]

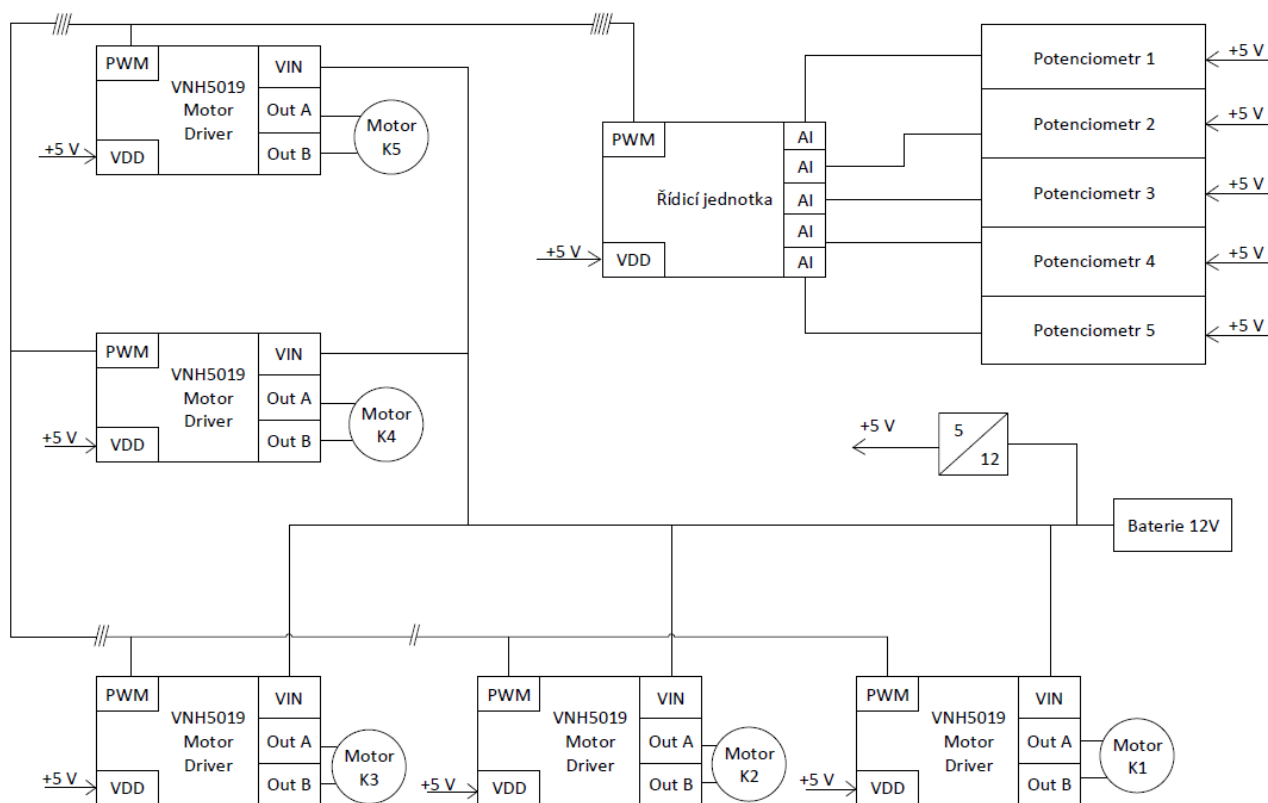
Tab. 18 – Parametry potenciometru [14]

Parametr	Hodnota/popis
Rozsah	300°
Odpor	10 kOhm
Průměr osy	6 mm
Cena	30 Kč

#### 6.4 Blokové schéma zapojení

Blokové schéma zapojení je možno vidět na Obr. 56. Výkonové napájecí napětí +12 V se přivádí na kontroléry a z nich do pohonů. Kontroléry jsou napájeny logickým napájecím napětím +5 V. Toto napětí se dostane pomocí DC/DC měniče z +12 V na +5 V.

Pohony se řídí pomocí pulsní šířkové modulace (PWM), které vytváří řídicí jednotka. Každý pohon má vlastní PWM signál.



Obr. 56 – Blokové schéma zapojení



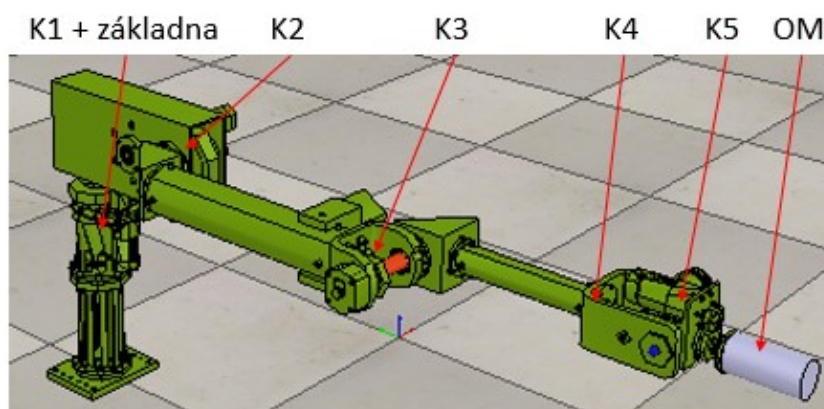
## 7 Simulace pohybu robotu

Pro simulaci pohybu manipulátoru byl zvolen program V-REP. Je to virtuální platforma pro testování robotů a různých kinematických struktur.

Model z programu PTC Creo byl importován do prostředí V-REP pomocí .stl souboru (rozložení geometrie na trojúhelníky). Importuje se pouze geometrie, veškeré vazby je nutno znovu nastavit.

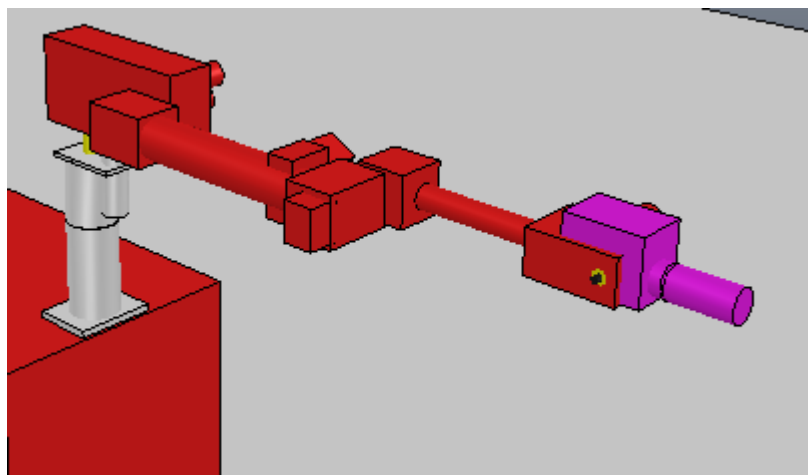
### 7.1 Simulační model

Importovaný model byl rozdělen do základních podsestav (kloub 5, kloub 4, kloub 3, kloub 2 a kloub 1 se základnou) viz Obr. 57.



Obr. 57 – Importovaný model

Pro usnadnění a urychlení výpočtu simulace, byly tyto podsestavy zjednodušeny primitivními tvary (krychle, válce apod.). Těmto podsestavám byla přiřazena odpovídající hmotnost a momenty setrvačnosti, které byly odečteny z programu PTC Creo. I když jsou tyto tvary zjednodušené, odpovídají obrysovým rozměrům manipulátoru. Lze je tedy využít i pro simulaci kolizí.

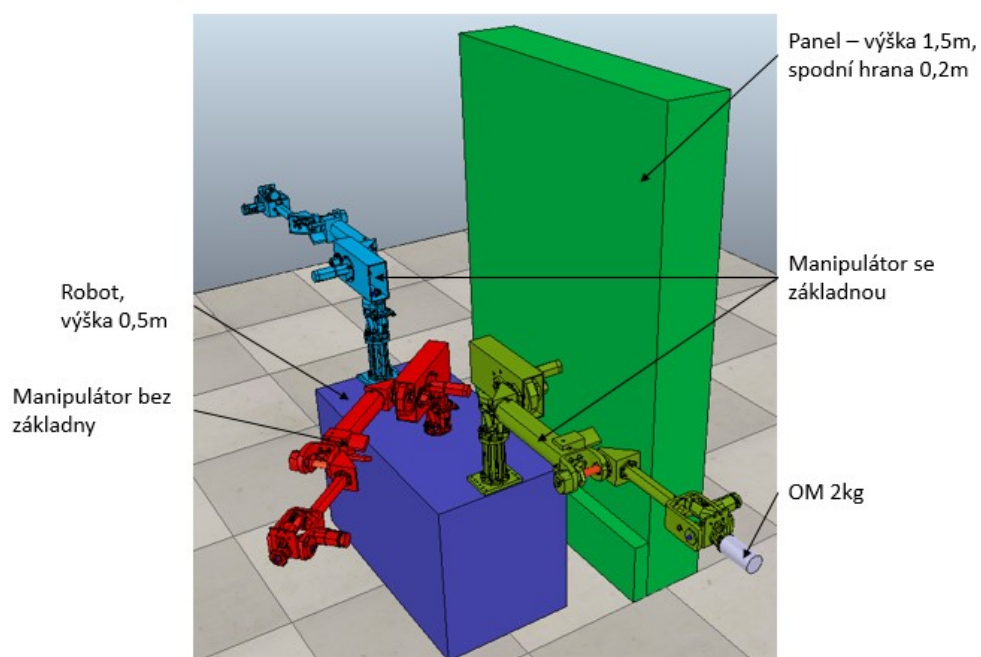


Obr. 58 – Dynamický model

Podsestavy manipulátoru jsou spojeny jointy – klouby (motory), kterým byly přiřazeny maximální povolené hodnoty krouticího momentu a rychlosti.

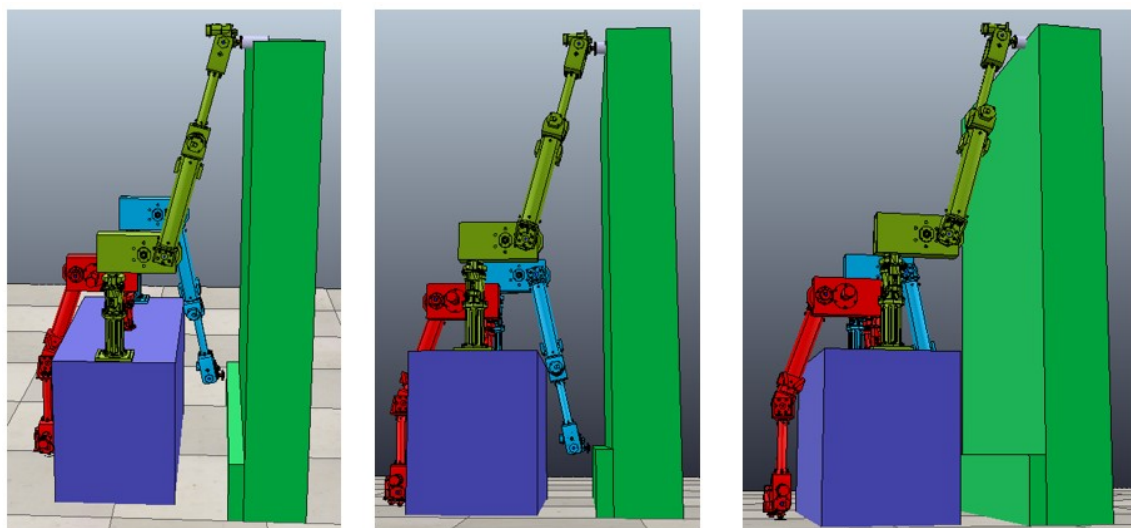
## 7.2 Požadované polohy

Pro simulaci dosahů do požadovaných poloh byla vytvořená scéna ve V-REPU, kde byly vloženy 3 manipulátory na kostku, která reprezentuje mobilní robot (jeho obrysové rozměry, hlavně výšku 0,5m). Pro každý manipulátor zvlášť byly nastavené kloubové proměnné.



Obr. 59 – Scéna pro pohyb

Na Obr. 60 je možno vidět dosahy robotu do požadovaných pozic. Velký zelený objekt reprezentuje panel, který bude osazen vypínači. Rozmístění vypínačů bude v rozmezí od 0,2 m do 1,5 m nad podločkou.

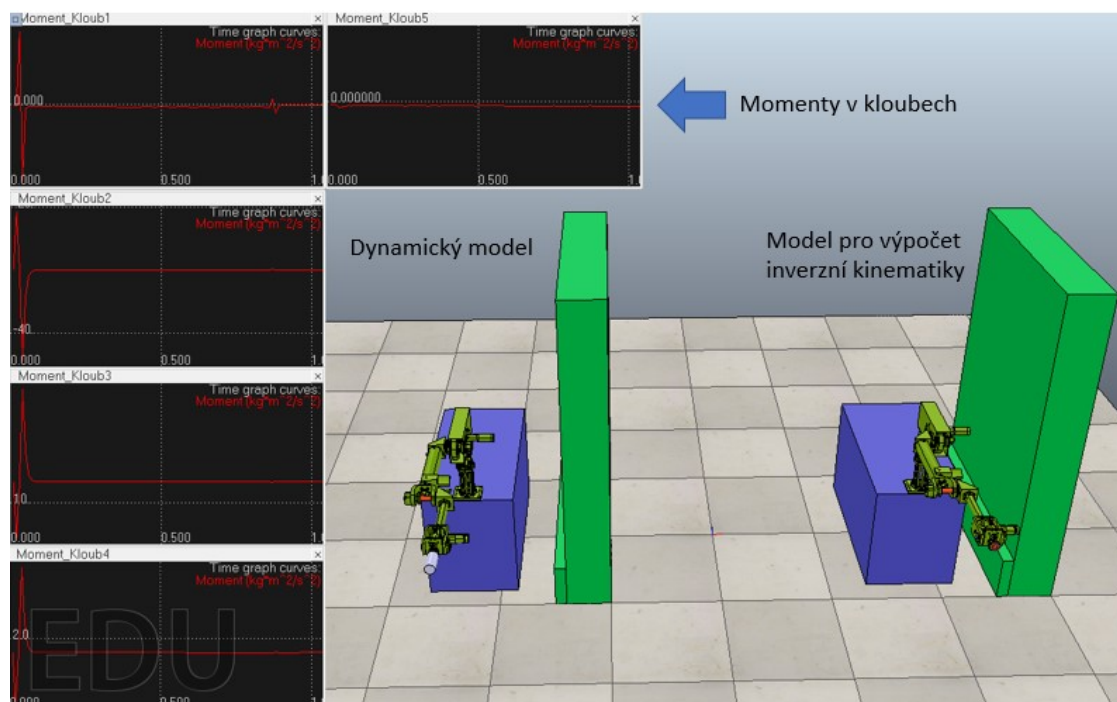


Obr. 60 – Dosahy do požadovaných pozic

### 7.3 Inverzní úloha kinematiky

Byla vytvořena scéna, kde jsou umístěny 2 manipulátory viz Obr. 61. Model manipulátoru po pravé straně je určen pro výpočet inverzní kinematiky (IK). Uživatel pohybuje koncovým bodem a program počítá natočení kloubových proměnných. Tento model nemá žádné dynamické vlastnosti.

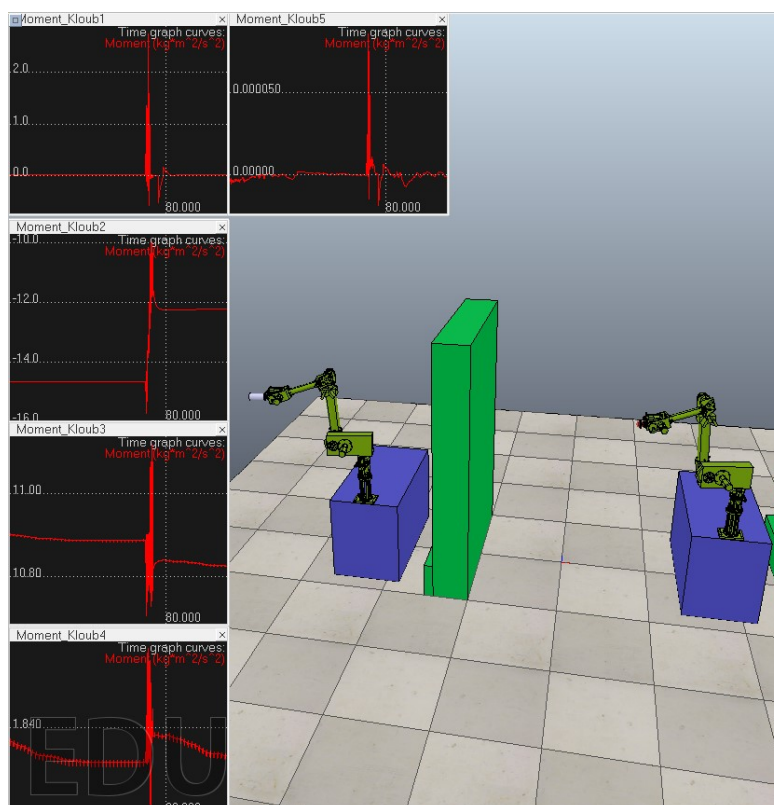
Byl napsán jednoduchý script, který posílá hodnoty kloubových proměnných do dynamického modelu.



Obr. 61 – Scéna pro inverzní úlohu kinematiky

Dynamický model kopíruje pohyb od modelu IK a počítá průběhy momentů v jednotlivých kloubech. Tyto momenty poté vykresluje do grafů.

Při změně polohy dochází ke změně průběhu momentů v kloubech – viz. Obr. 62.



Obr. 62 – Scéna inverzní kinematiky

## 8 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout manipulátor pro mobilní robot pro ERC soutěž. V úvodní části byl zpracován přehled obdobných systémů. Dále byl proveden rozbor úloh soutěže, z nichž vzešly další parametry do požadavkového listu.

Byly navrženy tři varianty kinematických struktur s potřebnými dosahy do požadovaných pozic. Pomocí kriteriální analýzy byla vybrána optimální varianta k detailnímu zpracování. Byla vybrána varianta B – kinematická struktura s 5 DoF, rotačními klouby a vyměnitelnou základnou pro nastavení výšky pro úlohu „údržba“.

Těla kloubů a ramena mezi klouby jsou tvořeny z bloků hliníku EN AW-6063 a hliníkových profilů EN AW-6060. Hřídele, příruby a kolíky jsou tvořeny z konstrukční oceli 11 600 (E355), která je vhodná pro dynamické i statické namáhání. Hmotnost manipulátoru je 10,1 kg, bez kabeláže a OM.

Všechny pohony manipulátoru mají zabudované enkodéry pro zpětnou vazbu o natočení kloubů. Z důvodů možných vůlí v převodech, byly do výstupních hřídelí zabudované potenciometry. Obsluha bude mít k dispozici dvojí zpětnou vazbu o natočení jednotlivých kloubů.

Byl stanoven požadavek na rotaci  $\pm 180^\circ$  prvního a posledního kloubu. Pro tyto klouby byly vybrány víceotáčkové potenciometry. U ostatních kloubů byly použity klasické potenciometry s rozsahem  $300^\circ$ , protože tyto klouby mají omezenou rotaci pomocí mechanických dorazů, aby nepřekročily povolený rozsah potenciometrů. Dorazy jsou vytvořeny z plastu. Pokud dojde ke kolizi, zdeformuje se plast, který se jednoduše vymění.

Úchyty potenciometrů a plastové vložky do výstupních hřídelí jsou vytvořeny pomocí 3D tisku.

Všecké ozubené převody budou mazány mazivem pro ozubená kola. Po odpaření vznikne vysoce přilnavý mazací film, který na sebe neváže prach. Všechny rotující části i ozubené převody jsou zakrytovány. Kryty pro klouby jsou vytvořeny pomocí 3D tisku.

Kontroléry pohonů budou umístěny v boxu na robotu s ostatním hardwarem. K pohonům na manipulátoru bude vedena kabeláž, částečně vnitřkem (dutými profily) a částečně mimo manipulátor.

Byla provedena simulace pohybu ramene v programu V-REP. Byly simulovány pohyby do požadovaných pozic se závažím 2 kg na konci příruby. Dále byla vytvořena scéna se dvěma manipulátory, kde jeden manipulátor počítá inverzní úlohu kinematiky a posílá natočení kloubových proměnných do druhého manipulátoru. Druhý manipulátor je dynamický, kopíruje pohyby manipulátoru s IK a počítá zatížení (moment) v kloubech. Takto připravenou scénu lze využít k řízení reálného manipulátoru.

## 9 Použitá literatura

1. Foto z ERC soutěže, Autor: Ing. Petr Šíroky, Ing. Robert Pastor, Bc. Jan Joheč
2. *ERC. ERC* [online]. 2016 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: <http://roverchallenge.eu/en/rules-2/>
3. *SRA Arm* [online]. 2017 [cit. 2017-10-12]. Dostupné z: <http://www.cpr-robots.com/products/sra.html>
4. *Robotnik* [online]. 2017 [cit. 2017-10-12]. Dostupné z: <http://www.robotnik.eu/robotics-arms/kinova-mico-arm/>
5. *Robotnik* [online]. 2017 [cit. 2017-10-12]. Dostupné z: <http://www.robotnik.eu/robotics-arms/robotis-manipulator/>
6. *Robotnik* [online]. 2017 [cit. 2017-10-12]. Dostupné z: <http://www.robotnik.eu/robotics-arms/lwa-4p/>
7. *Kluzná pouzdra* [online]. 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: [https://www.hennlich.cz/uploads/iglidur\\_G.pdf](https://www.hennlich.cz/uploads/iglidur_G.pdf)
8. *Mazání převodů* [online]. 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: [http://www.oleje.cz/p/kim-tec-mazivo-na-ozubena-kola-400-ml-spray--18509?gclid=EAIaIQobChMIocjtpzT2gIVybYYCh0w0gfFEAQYASABEgJ2mfD\\_BwE](http://www.oleje.cz/p/kim-tec-mazivo-na-ozubena-kola-400-ml-spray--18509?gclid=EAIaIQobChMIocjtpzT2gIVybYYCh0w0gfFEAQYASABEgJ2mfD_BwE)
9. *Pololu Gearmotor* [online]. 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2827>
10. *Servocity Gearmotor* [online]. 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.servocity.com/60-rpm-hd-premium-planetary-gear-motor-w-encoder>
11. *Servocity Gearmotor* [online]. 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.servocity.com/45-rpm-hd-premium-planetary-gear-motor-w-encoder>

12. *Pololu kontrolér* [online]. 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/1451>
13. *Potenciometr* [online]. 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/potenciometr-viceotackovy-pm-2205-10k>
14. *Potenciometr* [online]. 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/pc1221nk010>
15. *Slitiny hliníku* [online]. 2018 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <http://www.strojmetal.cz/tabulka-slitin>

## 10 Seznam obrázků

Obr. 1 - prostředí ERC [1] .....	- 9 -
Obr. 2 - Vzorek – kámen [1].....	- 11 -
Obr. 3 - Panel A [1] .....	- 12 -
Obr. 4 - Panel B [1].....	- 12 -
Obr. 5 - Součást k manipulaci [1] .....	- 13 -
Obr. 6 - SRA Service [3] .....	- 14 -
Obr. 7 - Kinova Mico <sup>2</sup> [4].....	- 15 -
Obr. 8 - Manipulator H [5].....	- 16 -
Obr. 9 - LWA 4P [6] .....	- 16 -
Obr. 10 - Varianta A .....	- 18 -
Obr. 11 - Rozložení hmotnosti varianty A.....	- 18 -
Obr. 12 - Pracovní prostor varianty A .....	- 19 -
Obr. 13 - Dosahy varianty A.....	- 19 -
Obr. 14 - Varianta B .....	- 20 -
Obr. 15 - Rozložení hmotnosti varianty B.....	- 20 -
Obr. 16 - Pracovní prostor varianty B.....	- 21 -
Obr. 17 - Dosahy varianty B.....	- 21 -
Obr. 18 - Varianta C .....	- 22 -
Obr. 19 - Rozložení hmotnosti varianty C.....	- 22 -
Obr. 20 - Pracovní prostor varianty C.....	- 23 -
Obr. 21 - Dosahy varianty C .....	- 23 -
Obr. 22 - Závislost počtu voleb a významnosti .....	- 25 -
Obr. 23 – Osové vzdálenosti manipulátoru .....	- 28 -
Obr. 24 – Poloha těžiště.....	- 29 -
Obr. 25 – Návrh kloubu K5 .....	- 29 -
Obr. 26 – Kloub 5 v řezu .....	- 30 -
Obr. 27 – Simulovaná zátěž.....	- 31 -

Obr. 28 – Návrh kloubu K4 .....	- 31 -
Obr. 29 – Kloub 4 v řezu .....	- 32 -
Obr. 30 – Spoj mezi kloubem 4 a 3 .....	- 33 -
Obr. 31 - Návrh kloubu K3 .....	- 33 -
Obr. 32 – Podsestava pohonu .....	- 34 -
Obr. 33 – Kloub 3 v řezu .....	- 35 -
Obr. 34 – Spoj mezi kloubem 2 a 3 .....	- 35 -
Obr. 35 – Návrh kloubu K2 .....	- 36 -
Obr. 36 – Kloub 2 v řezu .....	- 37 -
Obr. 37 – Doraz kloubu 2 .....	- 37 -
Obr. 38 – Návrh kloubu K1 .....	- 38 -
Obr. 39 – Podsestava pohonu .....	- 39 -
Obr. 40 – Uchycení pohonu.....	- 39 -
Obr. 41 – Kloub 1 v řezu .....	- 40 -
Obr. 42 – Základna .....	- 41 -
Obr. 43 – Manipulátor s krytováním .....	- 41 -
Obr. 44 – Kryt K5 .....	- 42 -
Obr. 45 – Kryt K4 .....	- 42 -
Obr. 46 – Kryt K3 .....	- 43 -
Obr. 47 – Kryt K2 .....	- 43 -
Obr. 48 – Kryt K1 .....	- 44 -
Obr. 49 – Pohon kloubu č. 5,4 a 1 [9].....	- 44 -
Obr. 50 – Pohon kloubu 3 [10] .....	- 45 -
Obr. 51 – Pohon kloubu 2 [11] .....	- 45 -
Obr. 52 – Motor kontrolér [12].....	- 46 -
Obr. 53 – Znázornění zapojení kontroléru [12] .....	- 46 -
Obr. 54 – Víceotáčkový potenciometr [13] .....	- 47 -
Obr. 55 – Odporový potenciometr [14] .....	- 47 -
Obr. 56 – Blokové schéma zapojení .....	- 48 -
Obr. 57 – Importovaný model.....	- 49 -
Obr. 58 – Dynamický model.....	- 50 -
Obr. 59 – Scéna pro pohyb .....	- 50 -
Obr. 60 – Dosahy do požadovaných pozic .....	- 51 -
Obr. 61 – Scéna pro inverzní úlohu kinematiky .....	- 52 -
Obr. 62 – Scéna inverzní kinematiky.....	- 52 -



## 11 Seznam tabulek

Tab. 1 - Parametry SRA Service manipulátoru .....	- 14 -
Tab. 2 - Parametry Kinova Mico <sup>2</sup> .....	- 15 -
Tab. 3 - Parametry Manipulátoru H.....	- 15 -
Tab. 4 – Parametry LWA 4P Gallery .....	- 16 -
Tab. 5 - Požadavkový list .....	- 17 -
Tab. 6 - Hodnocená kritéria .....	- 24 -
Tab. 7 - Stupnice hodnocení .....	- 24 -
Tab. 8 - Významnost kritérií.....	- 24 -
Tab. 9 - Metoda trojúhelníkových párů .....	- 25 -
Tab. 10 - Hodnocení varianty A .....	- 26 -
Tab. 11 - Hodnocení varianty B.....	- 26 -
Tab. 12 - Hodnocení varianty C.....	- 27 -
Tab. 13 – Parametry pohonu Pololu [9].....	- 45 -
Tab. 14 – Parametry pohonu kloubu 3 [10] .....	- 45 -
Tab. 15 – Parametry pohonu kloubu 3 [11] .....	- 46 -
Tab. 16 – Parametry motor kontroléru [12].....	- 46 -
Tab. 17 – Parametry víceotáčkového potenciometru [13].....	- 47 -
Tab. 18 – Parametry potenciometru [14] .....	- 48 -

## 12 Seznam příloh

### Příloha A: Výpočty

- Návrh pohonů
- Kontrola ozubení, hřídelí a per
- Kontrola ložisek

### Příloha B: Pevnostní analýzy

- Pevnostní analýzy součástí
- Síly ve šroubech

### Příloha C: Výkresová dokumentace

- Sestavný výkres manipulátoru
- Sestavný výkres kloubu K4
- Výrobní výkres ramene K43

### Příloha D: CD – Dominik Heczko – Diplomová práce 2017/2018

#### Obsah CD:

- Diplomová práce ve formátu PDF a DOCX
- Výsledný 3D model v programu PTC Creo 4.0
- Simulační model v programu V-REP
- Výkresová dokumentace